

# Impact du changement climatique sur les infrastructures routières – Analyse de risque et mesures d’adaptation

THÈSE N° 5611 (2013)

PRÉSENTÉE LE 15 FÉVRIER 2013

À LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE DES VOIES DE CIRCULATION  
PROGRAMME DOCTORAL EN ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Patrick RYCHEN**

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-L. Scartezzini, président du jury  
Prof. A.-G. Dumont, directeur de thèse  
Dr C. Angst, rapporteur  
Prof. A. Carter, rapporteur  
Prof. A. Schleiss, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2013



## RÉSUMÉ

Les conditions météorologiques ont un impact direct sur les infrastructures routières. Alors que certaines conditions météorologiques sont considérées lors de plusieurs étapes de la vie d'une chaussée, le phénomène de changement climatique n'est pour l'instant pas pris en compte. Ce fait pourra dans un futur proche, impliquer des conséquences marquées sur la durée de vie des chaussées.

L'objectif principal de la thèse consiste à évaluer l'impact du changement climatique sur les performances des infrastructures routières et d'en tirer des recommandations à travers la proposition de mesures d'adaptation. Les implications et contributions souhaitées pour la pratique sont nombreuses et permettent d'intégrer le phénomène de changement climatique dans les objectifs à long terme de la vie d'une chaussée routière.

Dans une première phase, une prévision des conditions météorologiques suisses est effectuée à l'aide d'un modèle climatique de pronostic novateur. L'évaluation des prévisions météorologiques montre que des changements importants des régimes de températures sont prévus d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Ainsi une augmentation des températures moyennes mais également une apparition plus fréquente des températures extrêmes est prévue. Un changement important des cycles de gel-dégel est également pronostiqué à travers une diminution du nombre de cycles et une diminution de la longueur des périodes de gel et de dégel. D'autres conditions météorologiques peuvent également présenter des changements conséquents, telles que les précipitations.

Dans la deuxième phase, l'impact du changement climatique sur l'état structurel et fonctionnel des chaussées est évalué. Dans un premier temps, l'impact du changement climatique sur le phénomène de gel-dégel et donc sur le dimensionnement au gel des chaussées en Suisse est analysé. Une forte baisse des indices de gel de l'air et donc une diminution des profondeurs de pénétration du gel est prévue pour toute la Suisse. Dans un deuxième temps, l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées est évalué à l'aide de la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique américaine. L'utilisation de l'outil de dimensionnement DARWin-ME permet d'intégrer une multitude de paramètres et de coupler la méthode avec le modèle climatique de pronostic. L'évaluation globale montre des impacts non négligeables sur les performances des chaussées en Suisse : L'orniérage peut être défini comme performance critique ; Trois grandes régions climatiques peuvent être déterminées par rapport à leur comportement ; Les régimes à trafic élevé peuvent être définis comme critiques ; Etc.

Dans une troisième phase, un facteur de risque est proposé. Il faut s'attendre à une augmentation générale du risque, liée à une diminution des durées de vie des chaussées. Ainsi des mesures d'adaptation sont proposées par rapport aux chaussées pour améliorer leurs capacités à résister au phénomène de changement climatique. Plusieurs mesures sont proposées et évaluées et des recommandations par rapport à leur mise en place sont données.

La thèse montre que l'impact du changement climatique peut être conséquent et indique des tendances nettes vis-à-vis du comportement des infrastructures routières suisses. Certains cas (trafic élevé, régions à températures élevées, etc.) nécessitent la mise en place de mesures d'adaptation déjà à court-terme (2020). Les mesures proposées, recourant à des technologies et techniques existantes et reconnues, sont néanmoins suffisantes pour lutter efficacement contre ce phénomène.

**Mots clés :** Infrastructures routières, revêtements routiers, changement climatique, performances, orniérage, dimensionnement au gel, dimensionnement mécanistique-empirique, durée de vie, analyse de risque, mesures d'adaptation.

## ABSTRACT

Weather conditions have a direct impact on road infrastructures. While certain conditions are considered at several stages in the design life of a pavement, the phenomenon of climate change is currently not taken into account. This fact may in the near future, involve significant consequences on the design life of pavements.

The main objective of the thesis is to assess the impact of climate change on the performance of road infrastructure and to draw recommendations through the proposition of adaptation measures. The desired contributions and implications for practice are numerous and allow integrating the phenomenon of climate change in the long-term goals of the pavement design life.

In a first phase, an innovative climate forecast model is used for forecasting weather conditions in Switzerland. The evaluation shows that significant changes in temperature regimes are predicted by the end of the 21<sup>st</sup> century. An increase in average temperatures but also a more frequent occurrence of extreme temperatures is predicted. A significant change in freeze-thaw cycles is also forecasted through a decline in the number of cycles and a reduction in the length of freeze and thaw periods. Other weather conditions can also show important changes, i.e. precipitation.

In the second phase, the impact of climate change on the structural and functional conditions of pavement is evaluated. At first, the impact of climate change on the phenomenon of freezing and thawing, and therefore on the frost design of roads in Switzerland, is analyzed. A sharp drop in freezing indices of air and therefore a decrease in frost depth penetration is predicted throughout Switzerland. In a second step, the impact of climate change on the performance of pavements was evaluated using the American mechanistic-empirical design guide. The use of the DARWin-ME design tool allows integrating a multitude of parameters and coupling the method with the climate forecast model. The overall assessment shows significant impacts on the performance of pavements in Switzerland: Rutting can be defined as the most critical performance; three major climatic regions can be identified regarding to their behavior; the heavy traffic regimes can be defined as critical; etc.

In the third phase, a risk factor is proposed. A general increase in risk, associated with a reduced length of pavement design life, must be expected. Thus, adaptation measures on pavements are proposed for improving their ability to resist the phenomenon of climate change. Several measures are proposed and evaluated and recommendations are given regarding to their implementation.

The thesis shows that the impact of climate change may be important and gives clear trends towards the behavior of Swiss road infrastructures. Some cases (heavy traffic, regions with high temperatures, etc.) require the implementation of adaptation measures already in the short term (2020). The proposed measures, using existing and recognized technologies and techniques, are nevertheless sufficient to fight against this phenomenon.

**Keywords:** Road infrastructures, pavements, climate change, performance, rutting, frost design, mechanistic-empirical pavement design guide, design life, risk analysis, adaptation measures.



## REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer par ces quelques lignes ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de quelque manière que ce soit, à la réalisation de cette thèse.

J'aimerais tout particulièrement témoigner de ma profonde reconnaissance envers mon directeur de thèse, le professeur André-Gilles Dumont, qui m'a soutenu tout au long de ce travail. Ses conseils avisés ont largement contribué à la réussite de cette thèse.

Un grand merci va également à tous mes collègues au sein du Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ils ont réussi à instaurer, grâce à leur bonne humeur, une ambiance de travail remarquable.

Je remercie encore les personnes externes au laboratoire qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail grâce à leurs conseils et critiques constructifs. J'aimerais tout particulièrement remercier le Dr. M. Ould-Henia, qui surtout au début de ma thèse a participé à enrichir celle-ci. Un grand merci va également au professeur A. Carter, qui m'a apporté une aide précieuse pendant son année sabbatique au LAVOC.

Je remercie également les personnes de Meteotest AG à Berne. Leur apport sur les questions météorologiques et climatiques et leur mise à disposition de leur outil de modélisation, m'ont permis d'intégrer ce domaine peu connu par moi-même au début du travail. Un grand merci va tout particulièrement à Mr. J. Remund, personne de contact au sein de Meteotest AG, qui m'a apporté une grande aide dans ce domaine.

J'aimerais aussi remercier l'Office Fédéral des Routes (OFROU) pour le financement du projet de recherche associé. En même temps j'aimerais remercier les membres de la commission de suivi du projet associé : C. Morzier, H.-P. Beyeler, T. Cypra, U. Keller et J.-C. Turtzschy. Ils ont pu apporter un regard extérieur au travail avec des conseils fort utiles.

Je remercie également les membres du jury, les professeurs A. Carter et A. Schleiss et le Dr. C. Angst pour l'intérêt porté à mon travail et le temps consacré à la lecture du document.

Finalement j'aimerais remercier mon proche entourage, et tout particulièrement mes parents, sans lesquels ce travail n'aurait jamais pu aboutir. MERCI pour tout votre soutien inconditionnel.

---

## TABLE DES MATIERES

|  |           |
|--|-----------|
| RÉSUMÉ.....  | i         |
| ABSTRACT.....  | ii        |
| REMERCIEMENTS .....  | iii       |
| TABLE DES MATIERES .....   | v         |
| LISTE DES FIGURES.....   | xi        |
| LISTE DES TABLEAUX .....   | xvii      |
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1. CONTEXTE ET MOTIVATIONS DE LA THÈSE.....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>1.2. OBJECTIFS DE LA THÈSE .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1.3. MÉTHODOLOGIE – PROGRAMME DE LA THÈSE .....</b>                                     | <b>2</b>  |
| 1.3.1. Étape 1 – Etat de l’art et considérations climatiques.....                          | 4         |
| 1.3.2. Étape 2 – Impact du changement climatique sur les performances des revêtements....  | 4         |
| 1.3.3. Étape 3 – Analyse de risque et mesures d’adaptation .....                           | 4         |
| <b>2. LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET LE DOMAINE DU TRANSPORT ROUTIER .....</b>          | <b>5</b>  |
| <b>2.1. IMPACTS DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES SUR LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES .....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1.1. Températures et conditions atmosphériques [11][13][33][67] .....                    | 5         |
| 2.1.2. Précipitations et humidité [11][13] .....   | 7         |
| 2.1.3. Vent et autres conditions météorologiques [11][13].....                             | 8         |
| <b>2.2. IMPACTS DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES SUR LE TRAFIC ET LES USAGERS .....</b>      | <b>8</b>  |
| 2.2.1. Accessibilité [12][33] .....  | 8         |
| 2.2.2. Sécurité [12][33] .....   | 8         |
| 2.2.3. Trafic [12][33] .....   | 8         |
| 2.2.4. Confort [12][33].....   | 10        |
| 2.2.5. Conditions hivernales [12][33] .....  | 10        |
| <b>2.3. PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES .....</b>                           | <b>10</b> |
| 2.3.1. Planification [11].....   | 10        |
| 2.3.2. Conception et dimensionnement [11] .....  | 10        |
| 2.3.3. Réalisation [11].....   | 11        |
| 2.3.4. Exploitation et entretien [11][12].....   | 11        |
| <b>2.4. LA SITUATION EN SUISSE .....</b>   | <b>11</b> |
| 2.4.1. Elaboration des projets [110] .....   | 11        |
| 2.4.2. Sols naturels et sols de fondations [107][146] .....                                | 12        |
| 2.4.3. Dimensionnement de la structure des chaussées [114][143].....                       | 12        |
| 2.4.4. Dévers d’une route [113].....   | 13        |
| 2.4.5. Conception des structures de chaussées – Enrobés bitumineux [118].....              | 13        |
| 2.4.6. Conception des structures de chaussées – Choix des matériaux [98][119].....         | 14        |
| 2.4.7. Réalisation des structures de chaussées .....                                       | 15        |
| 2.4.8. Couches traitées aux liants hydrauliques [104][123] .....                           | 16        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.4.9. Caractéristiques de surface [95][124] .....  | 16        |
| 2.4.10. Signalisation et marquage .....   | 16        |
| 2.4.11. Systèmes d'évacuation des eaux de chaussée [116].....   | 17        |
| 2.4.12. Gestion de l'entretien des chaussées.....   | 17        |
| 2.4.13. Entretien des routes – Service hivernal [131] .....   | 17        |
| 2.4.14. Ecrans antibruit et anti-éblouissement .....  | 18        |
| 2.4.15. Mesures acoustiques [90][106][127][129] .....   | 18        |
| 2.4.16. Mesures de déflexion [115][130][147].....   | 19        |
| 2.4.17. Gestion du trafic [132].....  | 19        |
| 2.4.18. Accidentologie [109].....   | 19        |
| 2.4.19. Capacité, vitesse et distance de visibilité .....   | 19        |
| <b>2.5. INTERACTION ENTRE DIFFÉRENTES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DES PARAMÈTRES LIÉS À LA ROUTE.....</b> | <b>20</b> |
| 2.5.1. La température du revêtement [8][15] .....   | 20        |
| 2.5.2. Humidité et teneur en eau de la fondation [15] .....   | 21        |
| 2.5.3. Phénomène de gel-dégel [15] .....  | 21        |
| <b>3. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>3.1. DÉFINITION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>3.2. DISTINCTION ENTRE LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES MOYENNES ET EXTRÊMES.....</b>                      | <b>25</b> |
| <b>3.3. CHANGEMENTS OBSERVÉS DU CLIMAT GLOBAL .....</b>   | <b>26</b> |
| 3.3.1. Températures .....   | 27        |
| 3.3.2. Précipitations.....  | 29        |
| 3.3.3. Autres paramètres météorologiques .....  | 31        |
| 3.3.4. Impacts globaux du changement climatique.....  | 32        |
| <b>3.4. CHANGEMENTS OBSERVÉS DU CLIMAT EN SUISSE .....</b>  | <b>34</b> |
| 3.4.1. Régions climatiques en Suisse .....  | 34        |
| 3.4.2. Mesures des paramètres météorologiques en Suisse.....  | 35        |
| 3.4.3. Températures .....   | 36        |
| 3.4.4. Précipitations.....  | 39        |
| 3.4.5. Autres paramètres météorologiques .....  | 41        |
| 3.4.6. Événements spécifiques .....   | 42        |
| 3.4.7. Impacts du changement climatique .....   | 45        |
| <b>3.5. PRÉVISION ET MODÉLISATION CLIMATIQUE.....</b>   | <b>45</b> |
| 3.5.1. Modélisation des conditions météorologiques .....  | 46        |
| 3.5.2. Prévisions des conditions météorologiques globales.....  | 49        |
| 3.5.3. Prévisions des conditions météorologiques en Suisse .....  | 53        |
| 3.5.4. Impacts du changement climatique .....   | 56        |
| <b>4. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE DOMAINE DU TRANSPORT ROUTIER.....</b>                                  | <b>57</b> |
| <b>4.1. RECHERCHES ET INITIATIVES TERMINÉES OU EN COURS .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>4.2. IMPACTS DUS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....</b>   | <b>59</b> |
| 4.2.1. Impacts sur les infrastructures routières.....   | 59        |
| 4.2.2. Impacts sur le trafic et les usagers .....   | 61        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>5. PRÉVISION DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES "ROUTIÈRES" EN SUISSE.....</b> | <b>63</b>  |
| <b>5.1. MODÈLE CLIMATIQUE DE PRONOSTIC – METEONORM 7.0 .....</b>              | <b>63</b>  |
| 5.1.1. Fonctionnement du modèle climatique de pronostic [68].....             | 63         |
| 5.1.2. Régions climatiques suisses.....                                       | 64         |
| <b>5.2. TEMPÉRATURES MOYENNES .....</b>                                       | <b>65</b>  |
| 5.2.1. Température moyenne annuelle.....                                      | 65         |
| 5.2.2. Température moyenne saisonnière .....                                  | 66         |
| 5.2.3. Répartition annuelle des températures .....                            | 67         |
| 5.2.4. Températures journalières estivales .....                              | 68         |
| <b>5.3. TEMPÉRATURES ÉLEVÉES .....</b>  | <b>69</b>  |
| 5.3.1. Température maximale annuelle .....                                    | 69         |
| 5.3.2. Température maximale saisonnière.....                                  | 71         |
| 5.3.3. Journées chaudes .....   | 72         |
| 5.3.4. Journées complètes chaudes.....  | 73         |
| 5.3.5. Périodes chaudes.....  | 74         |
| <b>5.4. BASSES TEMPÉRATURES .....</b>   | <b>76</b>  |
| 5.4.1. Température minimale annuelle.....                                     | 76         |
| 5.4.2. Température minimale saisonnière .....                                 | 77         |
| 5.4.3. Journées froides .....   | 79         |
| 5.4.4. Journées complètes froides.....  | 80         |
| 5.4.5. Périodes froides.....  | 81         |
| <b>5.5. VARIATION DES TEMPÉRATURES .....</b>                                  | <b>82</b>  |
| 5.5.1. Variation annuelle maximale.....                                       | 82         |
| 5.5.2. Variation journalière moyenne (annuelle et saisonnière).....           | 83         |
| 5.5.3. Variation journalière maximale (annuelle et saisonnière) .....         | 84         |
| 5.5.4. Variation journalière minimale (annuelle et saisonnière).....          | 85         |
| 5.5.5. Variation horaire maximale (annuelle et saisonnière) .....             | 86         |
| 5.5.6. Variation maximale en 6h (annuelle et saisonnière).....                | 87         |
| <b>5.6. CYCLES DE GEL-DÉGEL .....</b>   | <b>89</b>  |
| 5.6.1. Nombre de cycles de gel-dégel.....                                     | 89         |
| 5.6.2. Périodes de gel-dégel .....  | 90         |
| <b>5.7. PRÉCIPITATIONS .....</b>  | <b>92</b>  |
| 5.7.1. Précipitations moyennes (annuelles et saisonnières) .....              | 92         |
| 5.7.2. Précipitations maximales (annuelles et saisonnières).....              | 93         |
| 5.7.3. Précipitations maximales sur 24h (annuelles et saisonnières).....      | 95         |
| 5.7.4. Périodes sèches (courtes et longues) .....                             | 96         |
| 5.7.5. Hauteur de neige moyenne (hivernale et mensuelle).....                 | 97         |
| 5.7.6. Hauteur de neige maximale (hivernale et mensuelle) .....               | 98         |
| <b>5.8. VENT.....</b>   | <b>98</b>  |
| 5.8.1. Vitesse moyenne annuelle.....  | 98         |
| 5.8.2. Vitesse maximale annuelle .....  | 99         |
| <b>5.9. CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES .....</b>                                   | <b>100</b> |
| 5.9.1. Ensoleillement moyen journalier .....                                  | 100        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 5.9.2. Ensoleillement maximal journalier .....   | 100        |
| <b>5.10. HUMIDITÉ RELATIVE .....</b>   | <b>101</b> |
| 5.10.1. Humidité relative moyenne annuelle .....   | 101        |
| <b>5.11. APERÇU DES PRINCIPAUX CHANGEMENTS DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET IMPACTS SUR LES<br/>INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES .....</b> | <b>102</b> |
| 5.11.1. Températures .....   | 102        |
| 5.11.2. Précipitations.....  | 103        |
| 5.11.3. Autres conditions.....   | 104        |
| <b>6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ÉTAT STRUCTUREL ET FONCTIONNEL DES<br/>CHAUSSÉES .....</b>                               | <b>105</b> |
| <b>6.1. ETAT STRUCTUREL ET ÉTAT FONCTIONNEL DES CHAUSSÉES.....</b>   | <b>105</b> |
| 6.1.1. Orniérage .....   | 106        |
| 6.1.2. Fissuration .....   | 108        |
| 6.1.3. Caractéristiques de surface .....   | 110        |
| <b>6.2. LA PROBLÉMATIQUE DE L'ORNIÉRAGE .....</b>  | <b>110</b> |
| 6.2.1. Loi d'évolution de l'indice d'état de planéité transversale $I_3$ (Suisse) [35] .....   | 111        |
| 6.2.2. Modèle de comportement LAVOC [26].....  | 112        |
| 6.2.3. Modèle de comportement HDM-4 [5] .....  | 119        |
| 6.2.4. Modèle de comportement BRRC [19] .....  | 120        |
| 6.2.5. Modèle de comportement suédois [18].....  | 122        |
| 6.2.6. Modèle de comportement M-E PDG [25].....  | 123        |
| 6.2.7. Comparaison des résultats .....   | 128        |
| <b>6.3. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE – MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT AU GEL SUISSE.....</b>  | <b>130</b> |
| 6.3.1. Méthode de calcul de l'indice de gel de l'air et de la profondeur de pénétration du<br>gel [143].....                         | 130        |
| 6.3.2. Hypothèses et paramètres d'analyse .....  | 133        |
| 6.3.3. Impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel des structures<br>routières .....                               | 134        |
| <b>6.4. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE – MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT MÉCANISTIQUE-<br/>EMPIRIQUE.....</b>                            | <b>146</b> |
| 6.4.1. Outils de dimensionnement DARWin-ME/M-E PDG [1][25] .....   | 146        |
| 6.4.2. Evaluation des performances [1][25] .....   | 148        |
| 6.4.3. Hypothèses et paramètres d'analyse .....  | 154        |
| 6.4.4. Impact du changement climatique sur les performances – Résultats principaux .....   | 158        |
| <b>7. ANALYSE DE RISQUE ET MESURES D'ADAPTATION .....</b>  | <b>183</b> |
| <b>7.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....</b>   | <b>183</b> |
| 7.1.1. Etape 1 : Définition du contexte climatique et des paramètres d'évaluation .....  | 185        |
| 7.1.2. Etape 2 : Evaluation de l'impact du changement climatique sur les performances<br>des chaussées .....                         | 187        |
| 7.1.3. Etape 3 : Evaluation de la durée de vie des chaussées et analyse de risque .....  | 188        |
| 7.1.4. Etape 4 : Mesures d'adaptation contre le changement climatique .....  | 188        |
| <b>7.2. EVALUATION DE LA DURÉE DE VIE DES CHAUSSÉES.....</b>   | <b>189</b> |
| 7.2.1. Méthodologie .....  | 189        |
| 7.2.2. Résultats détaillés.....  | 190        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 7.2.3. Résumé des principaux résultats.....                            | 194        |
| <b>7.3. ANALYSE DE RISQUE .....</b>                                    | <b>198</b> |
| 7.3.1. Méthodologie .....  | 198        |
| 7.3.2. Exemple de calcul .....   | 200        |
| 7.3.3. Résultats principaux .....                                      | 201        |
| 7.3.4. Définition d'un facteur de risque .....                         | 203        |
| <b>7.4. MESURES D'ADAPTATION CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b> | <b>204</b> |
| 7.4.1. Définition du facteur de risque $\Delta f_{cc}$ .....           | 205        |
| 7.4.2. Changement des paramètres structurels.....                      | 206        |
| 7.4.3. Changement des paramètres des matériaux .....                   | 225        |
| 7.4.4. Recommandations.....  | 235        |
| <b>8. CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS.....</b>                | <b>239</b> |
| 8.1. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS.....                     | 239        |
| 8.2. PROPOSITIONS POUR DES RECHERCHES ULTÉRIEURES .....                | 242        |
| <b>9. BIBLIOGRAPHIE .....</b>  | <b>243</b> |
| 9.1. BIBLIOGRAPHIE "ROUTE" .....                                       | 243        |
| 9.2. BIBLIOGRAPHIE "CHANGEMENT CLIMATIQUE" .....                       | 245        |
| 9.3. NORMES .....  | 248        |
| 9.4. BIBLIOGRAPHIE SÉLECTIVE RELATIVE À LA THÈSE.....                  | 250        |
| <b>10. ANNEXES .....</b>   | <b>253</b> |
| 10.1. ORNIÉRAGE.....   | 253        |
| 10.2. DIMENSIONNEMENT AU GEL.....                                      | 267        |
| 10.3. RÉSULTATS DARWIN-ME – IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....       | 276        |
| 10.4. ANALYSE DE RISQUE – DÉTERMINATION DES CATÉGORIES DE RISQUE ..... | 328        |
| 10.5. MESURES D'ADAPTATION .....                                       | 332        |
| <b>11. CURRICULUM VITAE .....</b>                                      | <b>367</b> |

---



## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1.1 – Démarche générale. ....  | 3  |
| Fig. 3.1 – Accroissement de trois gaz à effet de serre entre 0 et 2010 [51][59]. ....   | 24 |
| Fig. 3.2 – Changement de la moyenne et de la variabilité des paramètres météorologiques mesurés. ....   | 26 |
| Fig. 3.3 – Hausse de la température de surface globale moyenne entre 1850 et 2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 [59]. ....  | 27 |
| Fig. 3.4 – Evolution du nombre de journées/nuits chaudes/froides (seuils variables 10%/90%) par décennie entre 1950 et 2002 par rapport à la période de référence 1961-1990 [36]. ....  | 29 |
| Fig. 3.5 – Evolution des précipitations annuelles par décennie entre 1946 et 1999 en Europe par rapport à la période de référence 1961-1990 [65]. ....  | 30 |
| Fig. 3.6 – Evolution du nombre de journées à fortes précipitations (>10 mm) et de l'intensité journalière par décennie entre 1950 et 2002 par rapport à la période de référence 1961-1990 [36]. ....                                    | 31 |
| Fig. 3.7 – Niveau moyen de la mer entre 1870 et 2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 [59]. ....   | 33 |
| Fig. 3.8 – Evolution globale des dommages assurés causés par des catastrophes naturelles de type météorologique depuis 1970 [71]. ....  | 33 |
| Fig. 3.9 – Carte des grandes régions climatiques en Suisse [42]. ....   | 34 |
| Fig. 3.10 – Carte des stations de mesure du réseau automatique SwissMetNet [67]. ....   | 36 |
| Fig. 3.11 – Variation de la température de surface moyenne entre 1864 et 2008 en Suisse par rapport à la période de référence 1961-1990 [73]. ....  | 36 |
| Fig. 3.12 – Evolution du nombre de journées chaudes annuelles en hiver (seuil variable : température minimale >80%) pour la ville de Neuchâtel entre 1901 et 2003 [78]. ....  | 38 |
| Fig. 3.13 – Relation altitude-anomalies de températures pour les mois de janvier entre 1978 et 1992 [42]. ....  | 38 |
| Fig. 3.14 – Evolution de l'écart des précipitations annuelles moyennes entre 1864 et 2007 en Suisse par rapport à la période de référence 1961-1990 [72]. ....  | 39 |
| Fig. 3.15 – Durée moyenne d'enneigement entre 1945 et 1994 pour trois stations alpines pour une épaisseur de neige supérieure à 10cm [44]. ....   | 40 |
| Fig. 3.16 – Evolution du nombre de journées à fortes précipitations en Suisse (seuil fixe : temps de retour de 30 ans) entre 1901 et 1994 pour l'hiver et l'été (en rouge : augmentation, en bleu : diminution) [70]. ....              | 41 |
| Fig. 3.17 – Comparaison des températures estivales pour l'été 2003 en Europe par rapport à la période de référence 1961-1990 [59]. ....   | 43 |
| Fig. 3.18 – Comparaison des températures journalières à Zurich pour l'année 2003 par rapport à la période de référence 1961-1990 [37]. ....   | 44 |
| Fig. 3.19 – Changement attendu des émissions et concentrations des principaux gaz à effet de serre pour les quatre familles de scénarios SRES [59]. ....  | 47 |
| Fig. 3.20 – Exemple d'une chaîne de plusieurs modèles climatiques [70]. ....  | 48 |
| Fig. 3.21 – Prévision du réchauffement globale pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 et selon différents scénarios climatiques [59]. ....   | 50 |
| Fig. 3.22 – Prévision du réchauffement globale pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 (en haut : scénario à faibles émissions B1 ; en bas : scénario à fortes émissions A2) [59]. .... | 50 |
| Fig. 3.23 – Prévision des changements globaux des précipitations pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 [59]. ....   | 51 |
| Fig. 3.24 – Prévision des changements globaux des journées avec gel (gauche) et des canicules (droite) pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 pour le scénario A1B [85]. ....          | 52 |
| Fig. 3.25 – Prévision des changements globaux des fortes précipitations (gauche) et des sécheresses (droite) pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 pour le scénario A1B [85]. ....    | 52 |
| Fig. 3.26 – Prévision du réchauffement en Suisse pour le 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à l'année de référence 1990 (à gauche : Nord des Alpes ; à droite : Sud des Alpes) [55]. ....   | 54 |
| Fig. 3.27 – Prévision des changements des précipitations en Suisse pour le 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à l'année de référence 1990 (à gauche : Nord des Alpes ; à droite : Sud des Alpes) [55]. ....                           | 54 |
| Fig. 3.28 – Prévision du réchauffement en Suisse pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle avec modification de la probabilité et de l'intensité des événements extrêmes par rapport à la période de référence 1960-1989 [71]. ....       | 55 |
| Fig. 3.29 – Prévision de la montée du niveau de la mer pour la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 [59]. ....   | 56 |
| Fig. 5.1 – Régions climatiques suisses selon [3]. ....  | 65 |
| Fig. 5.2 – Température moyenne annuelle pour le site de Lausanne selon les trois scénarios climatiques. ....  | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 5.3 – Augmentation de la température moyenne annuelle par rapport à la période de référence 1960-1990 pour certains sites géographiques (scénario climatique B1)..... | 66 |
| Fig. 5.4 – Température moyenne saisonnière pour le site de Sion selon le scénario climatique A1B.....  | 67 |
| Fig. 5.5 – Augmentation de la température moyenne estivale pour certains sites géographiques (scénario climatique A2).....   | 67 |
| Fig. 5.6 – Courbes de répartition des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B.....   | 68 |
| Fig. 5.7 – Courbes de répartition des températures pour le site de Lugano pour les trois scénarios climatiques.....  | 68 |
| Fig. 5.8 – Températures estivales pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B. ....   | 69 |
| Fig. 5.9 – Température maximale annuelle pour le site de Altdorf selon les trois scénarios climatiques.....  | 69 |
| Fig. 5.10 – Augmentation de la température maximale annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 70 |
| Fig. 5.11 – Température maximale annuelle pour le site de Coire et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.....                                 | 70 |
| Fig. 5.12 – Température maximale saisonnière pour le site de Berne selon le scénario climatique A1B.....   | 71 |
| Fig. 5.13 – Température maximale hivernale pour le site de Sion et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.....                                 | 72 |
| Fig. 5.14 – Nombre de journées chaudes pour le site de Zurich pour des températures de 25°C et 30°C selon les trois scénarios climatiques. ....                            | 72 |
| Fig. 5.15 – Nombre de journées chaudes (>25°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 73 |
| Fig. 5.16 – Nombre de journées complètes chaudes pour le site de Lausanne pour des températures de 15°C et 20°C selon les trois scénarios climatiques. ....                | 73 |
| Fig. 5.17 – Nombre de journées complètes chaudes (>15°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 74 |
| Fig. 5.18 – Nombre de périodes chaudes pour le site de Altdorf pour des températures de 15°C selon les trois scénarios climatiques.....                                    | 74 |
| Fig. 5.19 – Nombre de périodes chaudes (>15°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 75 |
| Fig. 5.20 – Nombre de périodes chaudes >15°C et >20°C pour le site de Lugano selon les trois scénarios climatiques.....  | 75 |
| Fig. 5.21 – Durée moyenne des périodes chaudes >15°C pour certains sites géographiques (scénario clim. A2).....  | 76 |
| Fig. 5.22 – Température minimale annuelle pour le site du Simplon selon les trois scénarios climatiques.....   | 76 |
| Fig. 5.23 – Augmentation de la température minimale annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 77 |
| Fig. 5.24 – Température minimale annuelle pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.....                     | 77 |
| Fig. 5.25 – Température minimale saisonnière pour le site de Coire selon le scénario climatique A1B. ....  | 78 |
| Fig. 5.26 – Température minimale estivale pour le site du Simplon et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques. ....                              | 78 |
| Fig. 5.27 – Nombre de journées froides pour le site de Berne pour des températures de 0°C et -5°C selon les trois scénarios climatiques. ....                              | 79 |
| Fig. 5.28 – Nombre de journées froides (<0°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 79 |
| Fig. 5.29 – Nombre de journées complètes froides pour le site de Zurich pour des températures de 0°C selon les trois scénarios climatiques. ....                           | 80 |
| Fig. 5.30 – Nombre de journées complètes froides (<0°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B). ....  | 80 |
| Fig. 5.31 – Nombre de périodes froides pour le site du Simplon selon les trois scénarios climatiques. ....   | 81 |
| Fig. 5.32 – Durée moyenne des périodes froides pour le site du Simplon et pour les trois scénarios climatiques.....  | 81 |
| Fig. 5.33 – Variation annuelle maximale des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 82 |
| Fig. 5.34 – Variation annuelle maximale des températures pour certains sites géographiques et pour des conditions extrêmes géographiques (scénario climatique A1B). ....   | 82 |
| Fig. 5.35 – Variation journalière moyenne annuelle des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....                                       | 83 |
| Fig. 5.36 – Variations journalières moyennes saisonnières des températures pour le site de Lausanne (scénario climatique A1B).....   | 83 |
| Fig. 5.37 – Variation journalière maximale annuelle des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour les trois scénarios climatiques. ....                       | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 5.38 – Variations journalières maximales saisonnières des températures pour le site de Altdorf (scénario climatique A1B).....  | 84  |
| Fig. 5.39 – Variations journalières maximales annuelles des températures pour le site de Berne et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.....   | 85  |
| Fig. 5.40 – Variation journalière minimale annuelle des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 85  |
| Fig. 5.41 – Variations journalières minimales saisonnières des températures pour le site de Sion (scénario climatique A1B).....   | 86  |
| Fig. 5.42 – Variation horaire maximale annuelle positive et négative des températures pour le site de Coire et pour les trois scénarios climatiques.....  | 86  |
| Fig. 5.43 – Variations horaires saisonnières positives des températures pour le site de Zurich (scénario climatique A1B).....   | 87  |
| Fig. 5.44 – Variation maximale en 6h annuelle positive et négative des températures pour le site de Lugano et pour les trois scénarios climatiques.....   | 87  |
| Fig. 5.45 – Variation maximale en 6h annuelle positive des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 88  |
| Fig. 5.46 – Variations en 6h saisonnières négatives des températures pour le site de Coire (scénario climatique A1B).....   | 88  |
| Fig. 5.47 – Variation maximale en 6h annuelle positive et négative des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.....                      | 89  |
| Fig. 5.48 – Nombre de cycles de gel-dégel pour le site de Lausanne selon les trois scénarios climatiques.....   | 90  |
| Fig. 5.49 – Nombre de cycles de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 90  |
| Fig. 5.50 – Nombre de périodes de gel-dégel pour le site de Altdorf selon les trois scénarios climatiques.....  | 91  |
| Fig. 5.51 – Nombre de périodes de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 91  |
| Fig. 5.52 – Durée moyenne des périodes de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario clim. A1B).....   | 92  |
| Fig. 5.53 – Précipitations moyennes annuelles pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 92  |
| Fig. 5.54 – Précipitations moyennes saisonnières pour le site de Berne (scénario climatique A1B).....   | 93  |
| Fig. 5.55 – Précipitations moyennes saisonnières pour le site de Lugano (scénario climatique A1B).....  | 93  |
| Fig. 5.56 – Précipitations maximales annuelles pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 94  |
| Fig. 5.57 – Précipitations maximales saisonnières pour le site de Zurich (scénario climatique A1B).....   | 94  |
| Fig. 5.58 – Précipitations maximales sur 24h annuelles pour certains sites géographiques (scénario clim. A1B).....  | 95  |
| Fig. 5.59 – Précipitations maximales sur 24h saisonnières pour le site de Sion (scénario climatique A1B).....   | 95  |
| Fig. 5.60 – Nombre de périodes sèches courtes et longues pour le site de Lugano selon les trois scénarios climatiques.....  | 96  |
| Fig. 5.61 – Nombre de périodes sèches courtes par saison pour le site de Altdorf (scénario climatique A1B).....   | 97  |
| Fig. 5.62 – Hauteur de neige moyenne hivernale pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 97  |
| Fig. 5.63 – Hauteur de neige maximale hivernale pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 98  |
| Fig. 5.64 – Vitesse moyenne annuelle du vent pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 99  |
| Fig. 5.65 – Vitesse maximale annuelle du vent pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 99  |
| Fig. 5.66 – Ensoleillement moyen journalier pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 100 |
| Fig. 5.67 – Ensoleillement maximal journalier pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....  | 101 |
| Fig. 5.68 – Humidité relative moyenne annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).....   | 101 |
| Fig. 5.69 – Courbes de répartition des températures moyennes pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B (gauche) et pour le site de Lugano pour les trois scénarios climatiques (droite)..... | 102 |
| Fig. 6.1 – Caractéristiques d'état et indices d'état [135].....   | 105 |
| Fig. 6.2 – Schéma du phénomène d'orniérage [136].....   | 106 |
| Fig. 6.3 – Profondeur d'ornières T et hauteur d'eau théorique t [125].....  | 107 |
| Fig. 6.4 – Transformation de la profondeur d'ornières T en valeur d'indice $I_3$ [135].....   | 108 |
| Fig. 6.5 – Exemple d'un scénario de changement des températures moyennes de +4°C (cas de Lonay).....  | 111 |
| Fig. 6.6 – Evolution de l'indice de planéité transversale $I_3$ en fonction de l'âge du revêtement.....   | 111 |
| Fig. 6.7 – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière par rapport au changement de température régionale de base du site.....   | 116 |
| Fig. 6.8 – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière pour un changement de la période de retour de la température maximale par rapport à la période actuelle de 20 ans.....                                | 116 |
| Fig. 6.9 – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière par rapport au changement de température régionale de base du site et de la période de retour de la température maximale.....                         | 117 |
| Fig. 6.10 – Méthode LAVOC : Degré de gravité selon l'indice de caractéristique de la planéité transversale $I_3$ .....  | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| Fig. 6.11 – Méthode LAVOC : Evolution de la durée de vie pour un état critique de l'indice $I_3$ par rapport au changement de la température régionale de base. ....   | 119 |
| Fig. 6.12 – Méthode BRRC : Evolution de la profondeur d'ornièrè relative par rapport au changement de température du site. ....  | 122 |
| Fig. 6.13 – Méthode M-E PDG : Evolution de la profondeur d'ornièrè totale (gauche) et des couches bitumineuses uniquement (droite) par rapport au changement de température du site. ....  | 124 |
| Fig. 6.14 – Méthode M-E PDG : Degré de gravité selon l'indice de caractéristique de dégradation de surface $I_3$ . ....  | 125 |
| Fig. 6.15 – Méthode M-E PDG : Evolution de la durée de vie pour un état critique de l'indice $I_3$ par rapport au changement de la température du site. ....   | 126 |
| Fig. 6.16 – Méthode M-E PDG : Evolution de l'indice IRI (haut), de la fissuration longitudinale (gauche) et du faïençage (droite) par rapport au changement de température du site. ....   | 127 |
| Fig. 6.17 – Evolution de la profondeur d'ornièrè relative par rapport au changement de température du site selon trois modèles. ....   | 128 |
| Fig. 6.18 – Profondeur d'ornièrè absolue par rapport au changement de température du site selon deux modèles. ....   | 129 |
| Fig. 6.19 – Définition graphique des indices de gel et de dégel [143]. ....  | 131 |
| Fig. 6.20 – Indice de radiation en fonction de l'ensoleillement [143]. ....  | 131 |
| Fig. 6.21 – Profondeur de pénétration du gel en fonction de l'indice de gel de la route [143]. ....  | 132 |
| Fig. 6.22 – Indice de gel significatif de l'air en Suisse selon la norme SN 670 140b [143]. ....   | 134 |
| Fig. 6.23 – Courbe cumulative des températures et indice de gel significatif de l'air pour la région du Valais à haute altitude et pour différentes périodes d'analyse (scénario climatique A1B). ....   | 136 |
| Fig. 6.24 – Changement relatif de l'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (scénario climatique A1B). ....   | 136 |
| Fig. 6.25 – Changement absolu de l'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (scénario climatique A2). ....   | 137 |
| Fig. 6.26 – Indice de gel significatif de l'air pour les différents scénarios climatiques et périodes d'analyse (région climatique du Valais à haute altitude). ....   | 137 |
| Fig. 6.27 – Profondeur de pénétration du gel pour les différents indices de radiation et périodes d'analyse (degré de gélivité G3 ; région climatique du Valais à haute altitude ; scénario climatique A1B). ....  | 141 |
| Fig. 6.28 – Profondeur de pénétration du gel pour les différents degrés de gélivité du sol et périodes d'analyse (région climatique du Jura ; indice de radiation nul ; scénario climatique A2). ....  | 141 |
| Fig. 6.29 – Profondeur de pénétration du gel pour les différents scénarios climatiques et périodes d'analyse (région climatique Plateau Est ; indice de radiation nul ; degré de gélivité G3). ....  | 142 |
| Fig. 6.30 – Changement relatif des profondeurs de pénétration du gel pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (indice de radiation nul ; degré de gélivité G4 ; scénario climatique A1B). ....   | 142 |
| Fig. 6.31 – Epaisseur nécessaire des chaussées contre le gel pour les différents indices de radiation et périodes d'analyse (degré de gélivité G3 ; région climatique du Valais à haute altitude ; scénario climatique A2 ; $f = 0.45$ ). ....   | 144 |
| Fig. 6.32 – Changement de l'épaisseur nécessaire des chaussées contre le gel par rapport à la période de référence pour les différents facteurs de dimensionnement et périodes d'analyse (degré de gélivité G4 ; indice de radiation nul ; région climatique du Jura ; scénario climatique A2). .... | 144 |
| Fig. 6.33 – Schéma conceptuel des outils DARWin-ME/M-E PDG [1][25]. ....   | 147 |
| Fig. 6.34 – Comportement typique de la déformation permanente des matériaux bitumineux [1][25]. ....   | 149 |
| Fig. 6.35 – Fissuration par fatigue du bas vers le haut (gauche) et du haut vers le bas (droite) [1][25]. ....   | 151 |
| Fig. 6.36 – Types de couches bitumineuses évaluées. ....   | 157 |
| Fig. 6.37 – Impact du trafic sur l'ornièrage total (Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence). ....  | 159 |
| Fig. 6.38 – Impact du sol de fondation sur l'ornièrage total (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence). ....  | 159 |
| Fig. 6.39 – Impact du type de superstructure sur l'ornièrage total (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Période de référence). ....  | 160 |
| Fig. 6.40 – Impact de la région climatique sur l'ornièrage total (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence). ....   | 160 |
| Fig. 6.41 – Impact de l'horizon d'analyse sur l'ornièrage total (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A2). ....  | 161 |
| Fig. 6.42 – Impact du scénario climatique sur l'ornièrage total (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Lausanne). ....  | 161 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 6.43 – Impact du trafic sur l’orniérage des couches bitumineuses (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Période de référence). .....  | 162 |
| Fig. 6.44 – Impact du sol de fondation sur l’orniérage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence). .....  | 163 |
| Fig. 6.45 – Impact du type de superstructure sur l’orniérage des couches bitumineuses (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence). .....   | 163 |
| Fig. 6.46 – Impact de l’horizon d’analyse sur l’orniérage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A2). .....                                   | 164 |
| Fig. 6.47 – Impact du changement climatique sur l’orniérage total et l’orniérage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Scénario climatique A2 ; Lausanne). ..... | 164 |
| Fig. 6.48 – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence). .....  | 165 |
| Fig. 6.49 – Impact du sol de fondation sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence). .....  | 166 |
| Fig. 6.50 – Impact du type de superstructure sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T3 ; Sol de fondation S4 ; Période de référence). .....   | 166 |
| Fig. 6.51 – Impact de la région climatique sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence). .....                          | 167 |
| Fig. 6.52 – Impact de l’horizon d’analyse sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B). .....                        | 167 |
| Fig. 6.53 – Impact du scénario climatique sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Lausanne). .....                                       | 168 |
| Fig. 6.54 – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence). .....                             | 169 |
| Fig. 6.55 – Impact du sol de fondation sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T4 (gauche) et T6 (droite) ; Type de superstructure 2 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence). .....     | 170 |
| Fig. 6.56 – Impact du type de superstructure sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Période de référence). .....                           | 170 |
| Fig. 6.57 – Impact de la région climatique sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Période de référence). .....                          | 171 |
| Fig. 6.58 – Impact de l’horizon d’analyse sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2). .....                         | 172 |
| Fig. 6.59 – Impact du scénario climatique sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Lausanne). .....                                       | 172 |
| Fig. 6.60 – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue dans les couches stabilisées (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence). .....   | 173 |
| Fig. 6.61 – Comportement d’une chaussée standard suisse sous conditions météorologiques de la ville de Minneapolis. ....  | 174 |
| Fig. 6.62 – Impact du trafic sur l’indice d’uni IRI (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence). .....  | 175 |
| Fig. 6.63 – Impact du sol de fondation sur l’indice d’uni IRI (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence). .....   | 176 |
| Fig. 6.64 – Impact du type de superstructure sur l’indice d’uni IRI (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence). .....   | 176 |
| Fig. 6.65 – Impact de la région climatique sur l’indice d’uni IRI (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence). .....  | 177 |
| Fig. 6.66 – Impact de l’horizon d’analyse sur l’indice d’uni IRI (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Scénario climatique A2). .....                             | 177 |
| Fig. 6.67 – Impact du scénario climatique sur l’indice d’uni IRI (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Lausanne). .....   | 178 |
| Fig. 6.68 – Impact du changement climatique sur l’orniérage total pour tous les cas confondus avec changement de la température de l’air (Trafic T6). .....   | 179 |
| Fig. 7.1 – Schéma de l’analyse de risque. ....  | 184 |
| Fig. 7.2 – Schéma de l’analyse de durée de vie et de l’analyse de risque – Etape 1 (1/2). .....   | 185 |
| Fig. 7.3 – Schéma de l’analyse de durée de vie et de l’analyse de risque – Etape 1 (2/2). .....   | 186 |
| Fig. 7.4 – Schéma de l’analyse de durée de vie et de l’analyse de risque – Etape 2. ....  | 187 |
| Fig. 7.5 – Schéma de l’analyse de durée de vie et de l’analyse de risque – Etape 3. ....  | 188 |
| Fig. 7.6 – Schéma de l’analyse de durée de vie et d’analyse de risque – Etape 4. ....   | 188 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 7.7 – Evolution de l’orniérage et loi d’évolution. ....  | 189 |
| Fig. 7.8 – Evolution de la fissuration et loi d’évolution. ....   | 190 |
| Fig. 7.9 – Durée de vie par rapport aux performances critiques (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2 ; Région "chaude").....   | 191 |
| Fig. 7.10 – Impact du trafic sur la durée de vie (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence).....  | 191 |
| Fig. 7.11 – Impact du sol de fondation sur la durée de vie (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence).....  | 192 |
| Fig. 7.12 – Impact du type de superstructure sur la durée de vie (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence). ....   | 192 |
| Fig. 7.13 – Impact de l’horizon d’analyse sur la durée de vie – diminution en valeurs relatives par rapport à la période de référence (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2).....                              | 193 |
| Fig. 7.14 – Impact du scénario climatique sur la durée de vie (Trafic T6 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Région "intermédiaire"). ....   | 194 |
| Fig. 7.15 – Durées de vie pour tous les cas évalués. ....   | 194 |
| Fig. 7.16 – Impact de l’adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "intermédiaire").....   | 208 |
| Fig. 7.17 – Impact de l’adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2 ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme). ....                             | 209 |
| Fig. 7.18 – Impact de l’adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à moyen terme). ....     | 209 |
| Fig. 7.19 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches de grave sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude"). ....  | 212 |
| Fig. 7.20 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches stabilisées sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Région climatique "intermédiaire").....   | 214 |
| Fig. 7.21 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "chaude"). ....  | 217 |
| Fig. 7.22 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches de fondation sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme). ....             | 217 |
| Fig. 7.23 – Types de couches bitumineuses évaluées et variation des épaisseurs. ....  | 220 |
| Fig. 7.24 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "chaude"). ....  | 221 |
| Fig. 7.25 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme). ....             | 222 |
| Fig. 7.26 – Impact de l’adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme). .... | 223 |
| Fig. 7.27 – Impact de l’adaptation du grade des liants composant les couches de surface sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "intermédiaire").....                               | 226 |
| Fig. 7.28 – Impact de l’adaptation du type de liant sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 5 ; Région climatique "chaude"). ....   | 229 |
| Fig. 7.29 – Mesure 9 – Adaptation des types de couches bitumineuses évaluées et variation des épaisseurs. ....  | 231 |
| Fig. 7.30 – Impact de l’adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude"). ....   | 232 |
| Fig. 7.31 – Impact de l’adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude"). ....   | 232 |
| Fig. 7.32 – Impact de l’adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme). ....                    | 233 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |     |
|---|-----|
| Tab. 2.1 – Aperçu des impacts des conditions météorologiques sur les infrastructures routières. ....  | 6   |
| Tab. 2.2 – Aperçu des impacts des conditions météorologiques sur le trafic et les usagers. ....   | 9   |
| Tab. 2.3 – Choix des types d’enrobés en fonction des sollicitations climatiques [118]. ....   | 14  |
| Tab. 3.1 – Aperçu des prévisions des conditions météorologiques moyennes et extrêmes pour la Suisse. ....   | 53  |
| Tab. 4.1 – Aperçu des impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures routières. ....   | 60  |
| Tab. 4.2 – Aperçu des impacts potentiels du changement climatique sur le trafic et les usagers. ....  | 62  |
| Tab. 5.1 – Sites géographiques choisis pour l’analyse de la prévision des conditions météorologiques. ....  | 65  |
| Tab. 6.1 – Températures régionales de base et gradients de température [3]. ....  | 114 |
| Tab. 6.2 – Valeurs correctives par rapport à la situation locale [3]. ....  | 114 |
| Tab. 6.3 – Coefficients de la fonction pour les régions Valais, Grisons et Sud des Alpes [3]. ....  | 114 |
| Tab. 6.4 – Ecart-type standard selon les régions [3]. ....  | 115 |
| Tab. 6.5 – Indice de gel significatif de l’air pour les différentes régions climatiques [°C·jour]. ....   | 135 |
| Tab. 6.6 – Catégorie d’indice de gel significatif de l’air pour les différentes régions climatiques [°C·jour]. ....   | 138 |
| Tab. 6.7 – Profondeur de pénétration du gel pour les sols de gélixivité G3 et pour les différentes régions climatiques [cm]. ....   | 139 |
| Tab. 6.8 – Profondeur de pénétration du gel pour les sols de gélixivité G4 et pour les différentes régions climatiques [cm]. ....   | 140 |
| Tab. 6.9 – Epaisseurs des chaussées nécessaires contre le gel de pénétration du gel pour un sol de gélixivité G3, un indice de radiation nul et pour les différentes régions climatiques [cm]. .... | 143 |
| Tab. 6.10 – Nouvelles catégories d’indice de gel significatif de l’air pour les différentes régions climatiques. ....   | 145 |
| Tab. 7.1 – Durée de vie des structures routières suisses – Scénario climatique modéré B1. ....  | 195 |
| Tab. 7.2 – Durée de vie des structures routières suisses – Scénario climatique extrême A2. ....   | 196 |
| Tab. 7.3 – Matrice de criticité et catégorie de risque associée. ....   | 199 |
| Tab. 7.4 – Exemple de calcul – Durées de vie pour la situation de risque évaluée. ....  | 201 |
| Tab. 7.5 – Exemple de calcul - Catégorie de risque pour la situation évaluée. ....  | 201 |
| Tab. 7.6 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses (première approche). ....   | 202 |
| Tab. 7.7 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses (deuxième approche). ....   | 203 |
| Tab. 7.8 – Facteurs de risque associés aux catégories de risque. ....   | 203 |
| Tab. 7.9 – Résultats principaux de l’analyse de risque des cas évalués par rapport aux mesures d’adaptation. ....   | 205 |
| Tab. 7.10 – Mesure 1 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 207 |
| Tab. 7.11 – Mesure 2 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 210 |
| Tab. 7.12 – Mesure 4 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 215 |
| Tab. 7.13 – Mesure 5 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 218 |
| Tab. 7.14 – Mesure 6 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 224 |
| Tab. 7.15 – Mesure 7 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 227 |
| Tab. 7.16 – Mesure 9 – Caractéristiques principales des matériaux bitumineux. ....  | 230 |
| Tab. 7.17 – Mesure 9 – Résultats principaux de l’analyse de risque des structures routières suisses. ....   | 234 |
| Tab. 7.18 – Mesures d’adaptation – Tableau récapitulatif. ....  | 235 |
| Tab. 7.19 – Mesures d’adaptation – Recommandations générales. ....  | 236 |

---



# 1. INTRODUCTION

## 1.1. Contexte et motivations de la thèse

Le changement climatique est un phénomène reconnu par une large majorité de la communauté scientifique. Ce changement se concrétise par une modification des conditions météorologiques moyennes et une apparition plus fréquente de conditions extrêmes. De par ses caractéristiques spécifiques il est probable que le phénomène va perdurer au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, même si des changements radicaux au niveau de la consommation de produits libérant des gaz à effet de serre devraient avoir lieu. Les conditions météorologiques ont un impact direct sur la société, les êtres humains et l'environnement naturel et bâti, et cet impact risque d'augmenter dans les décennies (voir siècles) à venir.

Le changement climatique touche également le domaine du transport routier et montre des impacts aussi bien au niveau du trafic et des usagers de la route que de l'infrastructure routière elle-même. Alors que certaines conditions météorologiques sont considérées lors de plusieurs étapes de la vie d'une chaussée (planification, dimensionnement, maintenance, etc.), le phénomène de changement climatique n'est pour l'instant pas pris en compte dans la plupart des pays. Ce fait pourra dans un futur proche avoir des conséquences marquées sur la sécurité des usagers, la durée de vie des revêtements, etc. Il est donc primordial de s'intéresser plus en détail à ce phénomène afin d'être préparé pour l'avenir et d'adapter le domaine du transport routier en conséquence.

Même si le domaine du transport routier possède une capacité d'adaptation assez grande par rapport à de nombreux changements des conditions météorologiques, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes de conditions extrêmes risquent d'entraîner des conséquences importantes, voir graves. Ce domaine de recherche est donc d'une importance élevée pour le bon fonctionnement du système routier dans le futur.

Il existe de nombreuses recherches évaluant l'impact des conditions météorologiques sur le domaine du transport routier, par contre le phénomène de changement climatique n'est que très rarement pris en considération. En ce qui concerne l'impact de ce phénomène sur les infrastructures routières et plus spécifiquement sur les performances des revêtements, les recherches étaient encore très peu nombreuses lors du lancement de la thèse. Actuellement, plusieurs recherches internationales ou nationales traitent plus spécifiquement ce domaine, mais ces recherches se limitent la plupart du temps à l'évaluation globale de l'impact du changement climatique sans proposition de mesures d'adaptation ni d'analyses plus spécifiques (analyse de risque, analyses météorologiques spécifiques, etc.). Des lacunes évidentes existent dans ce domaine de recherche et tout particulièrement au niveau de la Suisse.

## 1.2. Objectifs de la thèse

Dans la présente thèse il n'est pas question de savoir si le changement climatique est bien réel, mais d'en évaluer les possibles impacts sur les infrastructures routières. L'objectif principal de la thèse consiste donc à évaluer l'impact du changement climatique sur les performances des infrastructures routières (chaussées) et d'en tirer des recommandations à travers des propositions de mesures d'adaptation.

Les implications et contributions souhaitées sont nombreuses :

- Meilleure compréhension du comportement des chaussées par rapport aux conditions météorologiques futures causées par le changement climatique.
- Intégration de nouveaux aspects dans les objectifs à long terme de la vie d'une route (changement climatique). Evaluation innovante grâce à l'utilisation de données climatiques régionales spécifiques pour la Suisse (partenariat ingénieurs-climatologues).
- Meilleur choix des types de revêtements et des matériaux à mettre en place pour une région et un horizon temporel donné, et ainsi, augmentation du niveau de sécurité du réseau routier en Suisse et de la durée de vie des revêtements.
- Diminution des coûts d'entretien et de maintenance des réseaux routiers.
- Détection de zones à risque et classification du réseau actuel.
- Propositions pour des recherches ultérieures dans le domaine du changement climatique et de son impact dans le domaine du transport routier.

La thèse pourrait par la suite permettre d'intégrer un nouvel aspect, le changement climatique, dans la normalisation suisse dans ses objectifs à long terme (choix des types de revêtement, choix des matériaux, dimensionnement, valeurs limites pour les matériaux, etc.).

La thèse se limite à l'analyse de l'impact du changement climatique sur les revêtements de type bitumineux couramment utilisés en Suisse. L'analyse des performances des infrastructures routières n'est pas exhaustive, seules les performances jugées "critiques" sont évaluées. La recherche se focalise principalement sur les routes à grande débit (RGD) et les routes principales (RP).

## 1.3. Méthodologie – Programme de la thèse

La thèse est divisée en trois étapes majeures, lesquelles sont décrites plus en détail dans les sections suivantes (Chapitres 1.3.1 à 1.3.3) :

- Etat de l'art et considérations climatiques : Analyse de l'interaction entre le domaine routier, les conditions météorologiques et le changement climatique – Etat de l'art détaillé. Définition du contexte climatique suisse (conditions météorologiques, régions climatiques, etc.). Aide à la mise au point d'un modèle climatique de pronostic.
- Impact du changement climatique sur les performances des revêtements : Prévission des conditions météorologiques suisses. Analyse de l'impact du changement climatique sur les performances des revêtements. Evaluation de modèles de comportement des performances et analyse de la durée de vie des revêtements à l'aide d'outils de modélisation.
- Analyse de risque et mesures d'adaptation : Définition de niveaux de performances. Evaluation de la durée de vie des revêtements avec et sans prise en compte de l'impact du changement climatique. Analyse du risque associé à la diminution des durées de vie et définition de facteurs de risque. Proposition et évaluation de mesures d'adaptation.

Un schéma de la démarche générale est donné dans la figure ci-après (Fig. 1.1).

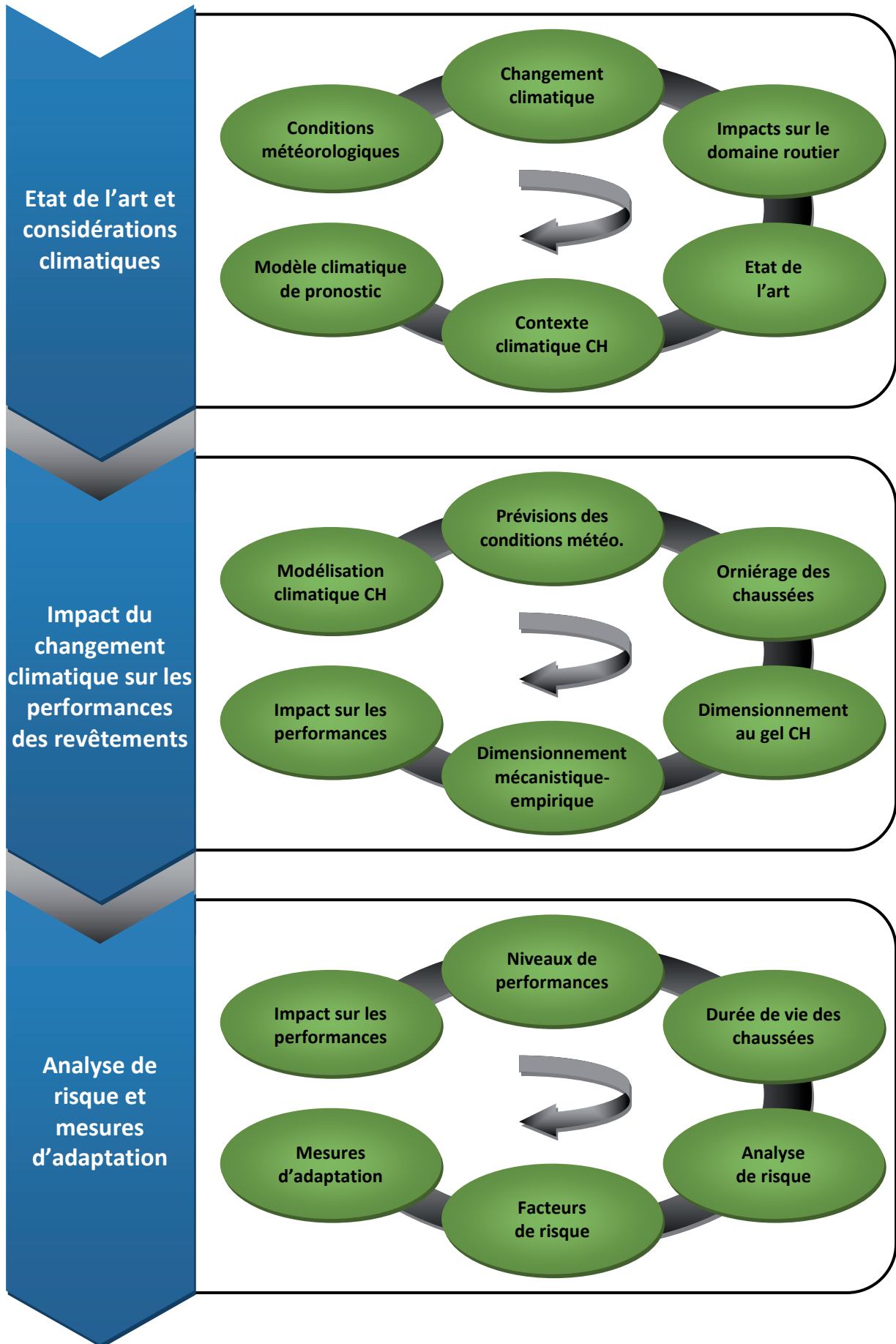


Fig. 1.1 – Démarche générale.

### **1.3.1. Étape 1 – Etat de l’art et considérations climatiques**

Dans un premier temps l’interaction entre le domaine routier, les conditions météorologiques et le changement climatique est discutée à l’aide d’un état de l’art détaillé. Une attention particulière est portée à la prise en compte des paramètres météorologiques dans les différentes étapes de la vie d’une infrastructure routière en se focalisant principalement sur la situation en Suisse.

Par la suite le phénomène de changement climatique est décrit de manière succincte et son probable et possible impact sur les conditions météorologiques est discuté. L’impact de ce phénomène sur le domaine routier est examiné et la situation suisse est abordée plus spécifiquement. Le point de vue des professionnels du domaine du transport routier est également discuté et certains événements spécifiques (p.ex. canicule en 2003) et leur impact sur les infrastructures routières sont décrits.

Finalement, le contexte climatique suisse est défini en détail (conditions météorologiques à risque, régions climatiques, etc.) et une aide à la mise au point d’un modèle climatique de pronostic pour la Suisse est apportée au développeur de l’outil (société privée Meteotest AG).

Dans cette première étape, l’impact du changement climatique sur le domaine global du transport routier est discuté. Par la suite, uniquement l’impact sur les infrastructures routières est évalué en détail.

### **1.3.2. Étape 2 – Impact du changement climatique sur les performances des revêtements**

La deuxième étape consiste à analyser l’impact du changement climatique sur les performances des revêtements. Tout d’abord modèle climatique de pronostic est employé afin de procéder à une prévision des conditions météorologiques suisses futures pour différentes périodes d’analyse, régions climatiques et scénarios climatiques.

Ensuite l’impact du changement climatique sur les performances des revêtements est évalué en combinant le modèle climatique de pronostic avec différents modèles de comportement des infrastructures routières. Trois problématiques sont traitées plus en détails par rapport à l’impact du changement climatique : l’orniérage des revêtements routiers, le dimensionnement au gel des infrastructures routières et le dimensionnement structurel des infrastructures routières.

### **1.3.3. Étape 3 – Analyse de risque et mesures d’adaptation**

Dans la troisième étape l’impact du changement climatique sur les infrastructures routières en Suisse est évalué en déterminant leurs durées de vie. Pour ce faire des niveaux de performances sont définis pour les modèles de comportement des revêtements et différents scénarios sont modélisés.

Ensuite une analyse de risque est mise au point, permettant d’associer le risque lié à une réduction de la durée de vie des revêtements, et des facteurs de risque sont définis. L’analyse de risque permet de définir les scénarios à risques (régions climatiques, types de chaussées, etc.).

Finalement, des mesures d’adaptation contre le changement climatique sont proposées (type revêtement, choix matériaux, dimensionnement, etc.) et évaluées à l’aide des modèles de comportement. L’évaluation économique des ces mesures ne fait pas partie des objectifs de la thèse.

## **2. LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET LE DOMAINE DU TRANSPORT ROUTIER**

Les conditions météorologiques ont un impact important sur le domaine du transport routier. Cet impact touche aussi bien les performances des infrastructures routières que le comportement des usagers et des véhicules.

Dans ce chapitre, les impacts des conditions météorologiques moyennes et extrêmes sur le domaine du transport routier sont décrits (Chapitres 2.1 et 2.2). Ensuite, la prise en compte des conditions météorologiques dans ce domaine est évaluée, que ce soit au niveau de l'infrastructure routière ou du transport et des usagers (Chapitre 2.3). Puis la situation en Suisse est abordée plus spécifiquement (Chapitre 2.4), et finalement, l'interaction entre différents paramètres météorologiques et des paramètres liés à la route est discutée (Chapitre 2.5).

Dans ce chapitre l'impact des conditions météorologiques est décrit de manière très large, en s'intéressant aussi bien aux infrastructures routières qu'au trafic et aux usagers de la route. Le terme "impact" employé dans cette thèse est défini comme suit : Effet, positif ou négatif, d'une condition météorologique, ou de manière générale, du changement climatique, sur un élément du domaine du transport routier (performances des revêtements, trafic, sécurité, etc.).

### **2.1. Impacts des conditions météorologiques sur les infrastructures routières**

Les infrastructures routières sont directement touchées par les conditions météorologiques, qu'il s'agit de conditions moyennes ou extrêmes. Ces conditions ont un impact sur les performances structurelles et fonctionnelles des chaussées, sur les matériaux, sur le choix du tracé d'une route, etc. Dans le tableau ci-après est donné un aperçu des impacts majeurs des paramètres météorologiques sur les infrastructures routières (Tab. 2.1). L'impact de ces conditions est discuté plus en détail dans les sections suivantes (Chapitres 2.1.1 à 2.1.3).

#### **2.1.1. Températures et conditions atmosphériques [11][13][33][67]**

Les températures et les conditions atmosphériques ont de multiples impacts sur les infrastructures routières. Ces impacts sont principalement liés aux changements des températures au sein d'une chaussée et de la fondation et aux phénomènes de gel-dégel. Les températures de l'air influencent directement les températures dans la chaussée, alors que les conditions atmosphériques (rayonnement solaire, rayonnement UV, nuages, etc.) peuvent accentuer ces phénomènes.

La température de l'air et le rayonnement sont deux facteurs souvent liés. Par exemple des températures élevées sont souvent associées à un fort rayonnement solaire. La plupart du temps l'on peut constater un léger décalage entre les cycles de rayonnement et les cycles de températures. En effet, des valeurs maximales de rayonnement sont en principe atteintes avant celles des températures (cas où la température correspond à une réaction du rayonnement). Néanmoins, cette interaction n'est pas toujours vérifiée, surtout en raison de l'effet des nuages. Par exemple en période hivernale on peut très bien assister à des phénomènes de rayonnement élevé et de basses températures de l'air.

| Paramètre                 | Impacts                             | Conséquences  |
|---------------------------|-------------------------------------|---|
| Température de l'air      | Température de chaussée             | Choix matériaux de chaussées (type de bitume, granulats)<br>Températures pour dimensionnement (températures représentatives moyennes, max, min)<br>Performances structurelles et fonctionnelles (orniérage, fissuration thermique, caractéristiques de surface, ressavage, vieillissement thermique des bitumes - oxydation, fatigue, adhérence, vieillissement UV)<br>Dilatation/contraction thermique (joints de ponts, chaussées en béton)<br>Températures limites de réalisation des chaussées (température minimale de pose) |
|                           | Cycles gel-dégel                    | Choix du tracé (permafrost, zones géologiquement instables, routes de glace)<br>Dimensionnement au gel (profondeur de gel)<br>Performances structurelles et fonctionnelles (fissuration thermique, caractéristiques de surface, fatigue, adhérence)   |
| Conditions atmosphériques | Rayonnement solaire, UV, IR, nuages | Accentuation du réchauffement/refroidissement de la température de chaussée<br>Accentuation du phénomène de gel-dégel<br>Dimensionnement au gel (indice de radiation)   |
|                           | Température de chaussée             | Accentuation du réchauffement/refroidissement de la température de chaussée   |
| Vent                      | Événements extrêmes                 | Dégâts à l'infrastructure (chute d'objet sur chaussée, dégâts à ouvrages d'art)   |
|                           | Pluie                               | Dimensionnement système d'évacuation des eaux (chaussées, tunnels, ponts)<br>Capacité fondation (niveau de la nappe, érosion fondation)<br>Performances structurelles et fonctionnelles (sensibilité à l'eau, érosion routes en gravier, adhérence)<br>Conditions limites de réalisation des chaussées  |
| Précipitations            | Neige                               | Performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, dégâts dus aux fondants et sels de déverglaçage)   |
|                           | Événements extrêmes                 | Dégâts à l'infrastructure (avalanches, inondations)   |
|                           | Sécheresse                          | Capacité portante fondation (tassement différentiel des sols asséchés)  |
| Humidité                  | Humidité de l'air                   | Performances structurelles et fonctionnelles (sensibilité à l'eau, adhérence)   |

**Tab. 2.1** – Aperçu des impacts des conditions météorologiques sur les infrastructures routières.

Les températures de l'air et le rayonnement déterminent le choix des matériaux à utiliser (types de bitume pour des conditions météorologiques données, sélection des granulats, etc.), au niveau du dimensionnement des chaussées et fondations (températures représentatives, températures maximales et minimales, indice de radiation, etc.), au niveau de la réalisation des infrastructures (températures de pose), au niveau du comportement des ouvrages d'art et de certains types de revêtements (dilatation/contraction thermique des ponts, chaussées en béton, etc.) et surtout au niveau des performances des chaussées. En effet, le couple température-rayonnement correspond à un des facteurs les plus importants affectant les performances structurelles et fonctionnelles des infrastructures routières :

- Les températures élevées peuvent provoquer ou accentuer des phénomènes d'orniérage, de ressuage, de vieillissement thermique, d'adhérence, de tassements différentiels des fondations asséchés, etc.
- Les températures basses et les changements de températures autour de 0°C peuvent provoquer ou accentuer des phénomènes de fissuration thermique, de fatigue, d'adhérence, etc.
- Les changements de températures journalières et surtout saisonnières peuvent provoquer ou accentuer des phénomènes de fissuration thermique et de fatigue.
- Le rayonnement peut accentuer les phénomènes liés aux températures élevées et peut provoquer des problèmes de vieillissement UV des matériaux (oxydation des bitumes et des polymères contenus).

Les cycles de gel-dégel, qui dépendent fortement des températures et du rayonnement, ont une influence sur le choix des tracés (zones géologiquement instables, pergélisol, etc.), sur le dimensionnement (dimensionnement au gel) et également sur les performances des infrastructures routières. Concernant les performances structurelles et fonctionnelles, les cycles de gel-dégel peuvent provoquer et accentuer les phénomènes de fissuration thermique, de fatigue, d'adhérence, etc. Les fondations des chaussées sont d'avantage touché par les phénomènes liés aux cycles de gel-dégel que par les phénomènes liés aux températures.

### **2.1.2. Précipitations et humidité [11][13]**

Les précipitations (pluie et neige) ainsi que l'humidité correspondent également à des facteurs ayant un impact important sur les infrastructures routières. Alors que les températures ont une influence prépondérante au niveau des revêtements, les précipitations ont un impact prépondérant au niveau des fondations. En effet un changement des précipitations se traduit par un changement de la teneur en eau des fondations, ce qui influence directement la capacité portante des sols.

Les précipitations influencent directement les caractéristiques des systèmes d'évacuation des eaux de surface, la capacité portante des fondations (érosion, nappe phréatique, etc.), les conditions de réalisation des chaussées ainsi que les performances des infrastructures. L'humidité de l'air joue principalement un rôle d'accélérateur des dégradations.

Concernant les performances structurelles et fonctionnelles des infrastructures routières, la pluie peut provoquer ou accentuer des phénomènes de sensibilité à l'eau (désenrobage, arrachement des grains), d'érosion des routes en gravier, d'adhérence, etc. Les précipitations solides, c.-à-d. sous forme de neige, peuvent en plus entraîner de manière indirecte des dégâts dus à l'utilisation de fondants chimiques ou de sel de déverglaçage.

Des périodes de précipitations extrêmes (forte pluie, absence prolongée de pluie, forte neige, etc.) peuvent de leur côté également provoquer des dégâts substantiels aux infrastructures. Des inondations ou des avalanches peuvent entraîner des dégradations des chaussées et des fondations et des périodes de sécheresses peuvent diminuer la capacité portante des fondations.

### **2.1.3. Vent et autres conditions météorologiques [11][13]**

D'autres conditions météorologiques peuvent avoir un impact sur les infrastructures routières, telles que le vent ou la pression atmosphérique. Ces conditions jouent principalement un rôle d'accélérateur des influences dues aux températures, aux conditions atmosphériques, aux précipitations et à l'humidité.

Le vent par exemple peut entraîner des changements plus rapides de la température de surface des chaussées dus à un brassage de l'air au-dessus de la route. En même temps, des événements extrêmes liés à ce paramètre (tornades, tempêtes, etc.) peuvent engendrer des dégâts importants à l'infrastructure routière (chute d'objets sur la chaussée, dégâts à des ouvrages d'art, etc.).

## **2.2. Impacts des conditions météorologiques sur le trafic et les usagers**

Le trafic et les usagers sont également touchés par les conditions météorologiques, qu'il s'agit de conditions moyennes ou extrêmes. Ces conditions ont un impact sur différents facteurs lors de l'exploitation d'une route, d'un réseau ou d'un ouvrage d'art. La plupart de ces facteurs ont une répercussion directe ou indirecte sur la société et l'économie. Les différents facteurs sont discutés plus en détail dans les sections suivantes (Chapitres 2.2.1 à 2.2.5). Dans le tableau ci-après est donné un aperçu des impacts majeurs des paramètres météorologiques sur le trafic et les usagers (Tab. 2.2).

### **2.2.1. Accessibilité [12][33]**

L'accessibilité à une route peut être gênée par des conditions météorologiques défavorables. Particulièrement lors d'événements extrêmes, une route peut être coupée suite à des inondations (fortes précipitations pluvieuses), des avalanches (fortes précipitations neigeuses et conditions météorologiques défavorables), de fortes précipitations neigeuses sur les routes (fermeture cols en hiver), de fortes tempêtes sur des ponts, etc. Ces conditions entraînent donc une diminution de l'accessibilité d'un réseau et des régions alentours.

### **2.2.2. Sécurité [12][33]**

Plusieurs conditions météorologiques ont un impact néfaste sur la sécurité. L'on peut mentionner les vents forts (instabilité des véhicules surtout sur les ouvrages d'art, risque d'objets tombant sur la chaussée, etc.), les précipitations (diminution de la visibilité, phénomène d'aquaplaning, adhérence faible, verglas sur la chaussée, etc.) ou le brouillard (diminution de la visibilité). Il s'agit ici de nouveau d'événements pouvant être décrits comme extrêmes.

Les conditions météorologiques ont une influence sur le risque d'accident. Ce risque peut être plus élevée pour des conditions extrêmes mais également en présence de conditions moyennes (neige, pluie, etc.).

### **2.2.3. Trafic [12][33]**

Le trafic est fortement influencé par les conditions météorologiques. Les usagers de la route ont tendance à adapter leur vitesse par rapport aux conditions extérieures, ce qui provoque une diminution des vitesses sur routes enneigées ou en présence de pluies ou de brouillard. Ceci diminue par la suite les débits sur les routes.

Le trafic peut également être influencé suite à une dégradation très marquée des infrastructures routières, empêchant ou gênant la circulation.



| Paramètre                 | Impacts               | Conséquences   |
|---------------------------|-----------------------|--|
| Température de l'air      | Confort               | Confort réduit par températures élevées (augmentation de la consommation de carburant pour la climatisation des véhicules)   |
| Conditions atmosphériques | Sécurité              | Diminution de la visibilité (brouillard, rayonnement solaire)<br>Augmentation du risque d'accidents (visibilité réduite)   |
|                           | Confort               | Accentuation des températures dans les véhicules<br>Confort réduit lié à la réduction de la sécurité (brouillard, rayonnement solaire)   |
| Vent                      | Sécurité              | Insécurité liée à la stabilité des véhicules<br>Risque d'objets tombant sur la route lors d'événements extrêmes  |
| Précipitations            | Accessibilité         | Accessibilité aux réseaux réduite lors d'inondations, d'avalanches neigeuses, de fortes précipitations neigeuses   |
|                           | Sécurité              | Diminution de la visibilité<br>Diminution de l'adhérence route-véhicule, apparition du phénomène d'aquaplaning<br>Présence de verglas lors de précipitations neigeuses<br>Augmentation du risque d'accidents |
|                           | Confort               | Confort réduit lié à la réduction de la sécurité   |
|                           | Trafic                | Diminution des vitesses, diminution des débits de trafic, etc.   |
|                           | Conditions hivernales | Augmentation de la maintenance hivernale des routes  |

Tab. 2.2 – Aperçu des impacts des conditions météorologiques sur le trafic et les usagers.

#### **2.2.4. Confort [12][33]**

Les conditions météorologiques peuvent avoir un impact direct sur le confort des usagers, surtout en été lors de températures très élevées ou en hiver lors de températures très basses. De même, ces conditions peuvent baisser le confort en instaurant un sentiment d'insécurité lié aux conditions extérieures (peu de visibilité, neige sur la chaussée, etc.).

#### **2.2.5. Conditions hivernales [12][33]**

La maintenance hivernale est évidemment directement reliée aux conditions météorologiques hivernales (températures, neige, etc.) et aux conditions de surface qui s'y rattachent (présence de neige, verglas, etc.).

### **2.3. Prise en compte des conditions météorologiques**

Les conditions météorologiques sont prises en compte à plusieurs étapes de la vie d'une route : Planification, conception, dimensionnement, réalisation, exploitation, entretien, etc. L'impact de ces conditions lors de ces étapes est discuté dans les sections suivantes (Chapitres 2.3.1 à 2.3.4).

#### **2.3.1. Planification [11]**

Les conditions météorologiques peuvent intervenir dans l'étape de planification d'une infrastructure routière au niveau du choix du tracé d'une route à implanter. En effet, des zones présentant des conditions hydrologiques (précipitations, cycles gel-dégel) défavorables devraient être évitées, afin de réduire le risque lié à des problèmes futurs de la portance des fondations (perte de portance, érosion des fondations, présence de permafrost, etc.) ou de l'apparition d'événements dangereux (glissement de terrains, avalanches, inondations, etc.).

#### **2.3.2. Conception et dimensionnement [11]**

Les infrastructures routières, ainsi que les ouvrages d'art (ponts, tunnels), sont conçues pour résister à des conditions météorologiques moyennes ou typiques, définies selon des conditions passées (intensités et fréquences déterminées statistiquement). Au niveau des chaussées, la température de l'air, le rayonnement solaire et les conditions hydrologiques (précipitations, cycles gel-dégel) sont les paramètres clés pour une conception et un dimensionnement correct des routes. Le vent peut avoir une influence directe sur la température de surface d'une chaussée (brassage d'air), mais il est également à considérer lors du dimensionnement des ponts (oscillation de l'ouvrage).

Lors de la conception d'une route, les conditions météorologiques ont une influence sur le choix des matériaux à mettre en place (fondation, superstructure, etc.). Par exemple des zones humides ou présentant de nombreux événements pluvieux peuvent nécessiter la mise en place de fondations traitées (p.ex. à la chaux), alors que des zones avec des températures estivales élevées peuvent entraîner l'utilisation de liants à grade dur pour des chaussées en enrobés bitumineux.

Les conditions météorologiques et les données de trafic correspondent aux paramètres à introduire dans les calculs de durée de vie des infrastructures routières. Elles ont des effets directs sur les performances structurelles (p.ex. orniérage, fissuration) et fonctionnelles (p.ex. adhérence) des chaussées. Les impacts des diverses conditions météorologiques sur les performances sont décrits plus en détail dans le chapitre 6.

La problématique du dimensionnement des routes vis-à-vis des conditions hivernales est également un point important où les conditions météorologiques sont présentes. La profondeur de gel des sols, ou l'indice de radiation d'une route, sont des facteurs directement reliés à ces conditions.

Les précipitations (surtout sous forme pluvieuse) dictent également la taille des systèmes d'évacuation des eaux d'une route.

### **2.3.3. Réalisation [11]**

Les conditions météorologiques interviennent également au niveau de la réalisation d'une route. Surtout par rapport à la pose des enrobés bitumineux, mais également des routes en béton, des conditions limites doivent être adoptées (températures minimales, absence de précipitations trop importantes, etc.). Les normes sur la réalisation des chaussées donnent des informations sur ces conditions limites (Chapitre 2.4).

### **2.3.4. Exploitation et entretien [11][12]**

Lors de l'exploitation d'une route, les conditions météorologiques peuvent avoir soit des impacts directs sur l'infrastructure, soit sur les usagers de la route et le trafic. Au niveau de l'infrastructure, les conditions météorologiques continuent à avoir un impact important sur les performances structurelles et fonctionnelles tout au long du cycle de vie des routes. Ces conditions jouent également un rôle d'amplificateur de problèmes existants, en effet, des dégradations d'une route sont accentuées par les conditions météorologiques. Elles interviennent donc au niveau de la fréquence, des coûts et de la gêne au trafic engendrés par les travaux d'entretien nécessaire à la remise en état des routes.

Des événements extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses, précipitations extrêmes, etc.) ont également un impact non négligeable sur les infrastructures routières (fondations, superstructure) et les ouvrages d'art (ponts, tunnels). Ces conditions sont néanmoins peu abordées par des gestionnaires de réseaux routiers.

Concernant les usagers et le trafic, les conditions météorologiques peuvent être prises en compte de différentes manières. Au niveau de la gestion du trafic, ces données sont exploitées en temps réel, alors que pour la maintenance hivernale les données météorologiques réelles ainsi que des prévisions à court-terme des conditions sont utilisées.

Les conditions météorologiques devraient dans un futur proche être davantage exploitées pour la partie opérationnelle du trafic et pour la gestion des événements exceptionnels. Ceci peut se faire par des moyens de communication (radio, panneaux à messages variables, systèmes d'alarme, etc.), par des moyens de contrainte (fermeture d'une route, mise en place de déviations, etc.), des moyens de prévision (limitation des vitesses, etc.), etc.

## **2.4. La situation en Suisse**

En Suisse, les conditions météorologiques interviennent également à différentes étapes de la vie d'une infrastructure routière. La prise en compte de ces conditions lors de certaines étapes majeures est discutée plus en détail dans les sections suivantes (Chapitres 2.4.1 à 2.4.19). Les normes suisses et européennes correspondantes sont également mentionnées.

### **2.4.1. Elaboration des projets [110]**

Les conditions météorologiques interviennent de manière indirecte dans différentes étapes de l'élaboration des projets routiers. En effet, la planification d'un tracé routier fait intervenir une étape d'évaluation des terrains naturels et des conditions météorologiques associés (niveau de la nappe phréatique, zones à risque pour glissements de terrains ou avalanches, etc.). Des zones à risque pour l'implantation d'une nouvelle infrastructure peuvent de cette manière être évitées.

En même temps, l'impact du nouveau tracé sur les conditions hydrologiques existantes doit faire l'objet d'une étude d'impact détaillée (écoulement des eaux de surface, impact sur les cours d'eau et les eaux souterraines, etc.).

#### **2.4.2. Sols naturels et sols de fondations [107][146]**

Les propriétés des sols naturels et des sols de fondations d'une nouvelle structure routière peuvent dépendre des conditions climatiques. Principalement, l'impact des paramètres hydriques sur ces sols est à considérer (niveau de la nappe phréatique, humidité du sol, présence et écoulement des eaux souterraines, etc.).

Les caractéristiques in situ des sols peuvent être déterminées à l'aide de plusieurs méthodes d'essais (essai de plaques, essai CBR, essai de Westergaard, etc.). Ces essais permettent de définir la portance d'un sol et d'en tirer les propriétés nécessaires pour le dimensionnement de la structure des chaussées. Les essais géotechniques de caractérisation des sols peuvent également dépendre des conditions météorologiques. En effet, il convient d'adapter les mesures par rapport aux conditions climatiques régnant pendant l'exécution des essais :

- Mesures piézométriques : Adaptation des mesures piézométriques par rapport à la pression atmosphérique réelle.
- Essais de pénétration (CBR, cône à pointe mécanique, etc.) : Exécution des essais de pénétration sur des sols avec teneur en eau "naturelle", c.-à-d. en dehors de périodes de précipitations ou de périodes sèches.
- Essai de plaque : Exécution de l'essai de plaque sur des sols avec teneur en eau "naturelle", c.-à-d. en dehors de périodes de précipitations ou de périodes sèches, et avec une humidité homogène sur une profondeur de 1.5 fois le diamètre de la plaque d'essai. Le dispositif d'essai doit en outre être protégé du rayonnement solaire direct et du vent. La température de l'air doit également être consignée lors de l'exécution de l'essai et intervient directement dans le calcul des caractéristiques des sols.

L'essai CBR, combiné à l'essai de gonflement au gel, peut également être appliqué en laboratoire pour prédire la gélivité d'un matériau.

#### **2.4.3. Dimensionnement de la structure des chaussées [114][143]**

Le dimensionnement de la structure des chaussées fait intervenir les conditions météorologiques. Plus particulièrement, le dimensionnement au gel des structures dépend des conditions d'ensoleillement et des paramètres de gélivité des sols :

- Indice de radiation, RI : L'indice de radiation correspond à une transformation de l'ensoleillement général pour un endroit donné en °C·jour. Les normes suisses permettent de déterminer à l'aide d'un abaque l'indice de radiation d'un tronçon donné en fonction de la somme journalière moyenne du rayonnement global sur une surface horizontale pendant les mois d'hiver ou de la durée d'ensoleillement journalière. Pour la détermination de l'indice il faut tenir compte de l'ensoleillement général de la région et des ombres portées sur le tronçon de route par des obstacles (bâtiments, montagnes, etc.). En outre, si une route est pendant une grande partie de l'hiver recouverte de neige tassée par le trafic, il convient de corriger l'indice de radiation RI (facteur de correction de 0.3 généralement utilisé).
- Degré de gélivité du sol, Gi : Le degré de gélivité du sol décrit la propension d'un sol à former des lentilles de glace. Il dépend principalement de la granulométrie et de la plasticité du sol mais également dans une moindre mesure de la minéralogie des particules fines, de la teneur en eau et de la compacité du sol. Il existe quatre degrés de gélivité, allant d'un sol de degré G1 correspondant aux sols très faiblement gélifs à un sol de degré G4 correspondant aux sols fortement gélifs.

- Indice de gel significatif de l'air,  $FI$  : L'indice de gel de l'air correspond à la plus grande différence en °C·jour entre le maximum et le minimum de la courbe cumulative des températures moyennes journalières de l'air pendant la période de gel. L'indice de gel significatif de l'air correspond à la moyenne des indices de gel de l'air des trois hivers les plus froids des 30 dernières années. Les normes suisses indiquent pour différentes régions l'indice de gel significatif de l'air à l'aide d'une carte nationale, basé sur des mesures des températures sur le territoire suisse entre 1957 et 1990.
- Indice de gel de la route,  $FI_s$  : L'indice de gel de la route correspond à l'indice de gel significatif de l'air adapté par rapport aux caractéristiques de la route (températures à la surface de la route). Il est déterminé par la combinaison de l'indice de gel de l'air et de l'indice de radiation :  $FI_s = FI - RI$ . Pour un indice de gel de l'air donné, l'indice de gel de la route peut fortement varier selon l'ensoleillement du tronçon.
- Profondeur de pénétration moyenne du gel,  $X_{30}$  : Profondeur moyenne du gel résultant des trois hivers les plus froids des 30 dernières années et dépendant du microclimat d'une région (température, rayonnement solaire, humidité, précipitations, conditions d'enneigement et vent) et des propriétés thermiques des matériaux. La profondeur de pénétration du gel correspond à la profondeur atteinte par l'isotherme 0°C sous la surface de la route. Elle peut être déterminée de manière concrète par des mesures in situ ou de manière approximative à l'aide de graphiques donnés dans les normes suisses. L'abaque de la norme [143] permet d'évaluer la profondeur de gel en fonction de l'indice de gel de la route  $FI_s$ , de l'épaisseur de la superstructure  $d_s$  et des caractéristiques de l'infrastructure ou du terrain (masse volumique sèche et teneur en eau).

Un dimensionnement au gel est nécessaire si le degré de gélivité  $G_i$  du sol correspond au degré G3 ou G4 et si l'indice de gel de la route  $FI_s$  est supérieur ou égal à l'indice de gel critique  $FI_s^*$  donné dans le catalogue des types de chaussées ( $FI_s \geq FI_s^*$ ). Dans ce cas, il convient de contrôler que l'épaisseur de la chaussée  $d_s$  selon le catalogue des types de chaussées est supérieure ou égale à la profondeur de pénétration moyenne du gel  $X_{30}$  multipliée par un facteur de dimensionnement au gel  $f$  donné également dans le catalogue des types de chaussées ( $d_s \geq f \cdot X_{30}$ ).

Le danger lié au gel-dégel est évalué par rapport aux conditions les plus défavorables prévisibles pour une région, c.-à-d. pour une longue durée de gel avec une pénétration lente de l'isotherme 0°C et un dégel rapide. Les dégâts peuvent se présenter sous la forme d'inégalités à la surface dues au gonflement des sols lors du gel, lesquels peuvent provoquer une fissuration importante des couches bitumineuses. Lors du dégel et sous l'action du trafic, des déformations irréversibles peuvent apparaître et entraîner une diminution de la portance de la structure ou sa destruction totale.

#### **2.4.4. Dévers d'une route [113]**

L'écoulement de l'eau de surface dû à la pluie impose un dévers minimal, même pour des tracés en alignement. Par exemple une pente transversale minimale de 3.0% (exceptionnellement 2.5%) est prescrite dans les normes suisses pour les routes à grand débit. Cette valeur ne tient néanmoins pas compte des intensités de précipitations ni du type de revêtement.

#### **2.4.5. Conception des structures de chaussées – Enrobés bitumineux [118]**

Certains enrobés sont à préférer ou à éviter selon les conditions climatiques rencontrées. Pour ce faire, trois catégories de sollicitations climatiques sont données dans les normes :

- Catégorie A : En altitude, températures particulièrement basses,
- Catégorie B : Conditions climatiques moyennes (plateau),
- Catégorie C : Très fort ensoleillement, températures particulièrement élevées.

Le type d'enrobé (L – sollicitation légère ; N – moyenne ; S – sévère ; H – très sévère) est à choisir en fonction des sollicitations climatiques selon le tableau ci-dessous, issu des normes suisses (Tab. 2.3).

| Walzasphalt, Empfehlungen zur Wahl der Mischguttypen bei normaler Beanspruchung<br>Enrobés bitumineux compactés, recommandations pour le choix des types d'enrobés en cas de sollicitation normale |   |                       |                       |                       |                                 |  |
|--|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|--|
| Klimatische Beanspruchungen, Kategorien<br>Sollicitations climatiques, catégories  | Tägliche äquivalente Verkehrslast<br>Trafic équivalent journalier TF [ESAL/d] |                       |                       |                       |                                 |  |
|  | ≤ 30  | > 30...100            | > 100...300           | > 300...1000          | > 1000...3000                   | > 3000...10000                           |
|  | Verkehrslastklassen<br>Classes de trafic pondéral                             |                       |                       |                       |                                 |  |
|  | T1<br>Sehr leicht<br>Très léger   | T2<br>Leicht<br>Léger | T3<br>Mittel<br>Moyen | T4<br>Schwer<br>Lourd | T5<br>Sehr schwer<br>Très lourd | T6<br>Extrem schwer<br>Extrêmement lourd |
| A  | L   | L                     | N                     | N, S                  | S                               | S  |
| B  | L   | N                     | N                     | S                     | S                               | H  |
| C  | N   | N                     | S                     | S                     | H                               | H  |

**Tab. 2.3** – Choix des types d'enrobés en fonction des sollicitations climatiques [118].

Pour des lieux présentant à la fois des températures élevées en été et des températures basses en hiver, il convient de vérifier soigneusement le choix des types d'enrobés.

Pour les bétons bitumineux drainants, il convient également de respecter certains critères supplémentaires liés aux conditions météorologiques. Les enrobés drainants étant particulièrement sensibles aux conditions hivernales, et plus spécifiquement aux phénomènes de gel et dégel, les normes interdisent leur utilisation pour des chaussées se trouvant en altitude (indice de gel de l'air supérieur à 500°C·jour).

Concernant les performances des enrobés bitumineux, ceux-ci doivent répondre à une multitude de critères [98][119]. Certains critères peuvent être liés à des conditions climatiques, tels que la résistance à l'orniérage ou la résistance aux cycles gel-dégel. Les normes prescrivent des critères moyens pour les différentes sortes d'enrobés, mais ne font en aucun moment intervenir des conditions climatiques réelles d'un lieu donné.

#### 2.4.6. Conception des structures de chaussées – Choix des matériaux [98][119]

Le type et les caractéristiques des liants, le type et les caractéristiques des granulats, etc. peuvent avoir des réponses bien distinctes envers les différentes conditions climatiques que l'on rencontre. Il convient donc de choisir les constituants en fonction des conditions climatiques d'un lieu donné.

##### 2.4.6.1. Bitumes et liants bitumineux [89][138]

Les propriétés des bitumes et liants bitumineux, de part leur comportement viscoélastique, sont fortement dépendant des conditions météorologiques, et tout particulièrement des températures. Afin de tester le comportement de ces matériaux par rapport aux conditions climatiques et d'en choisir les plus adaptés, plusieurs méthodes d'essais sont appliquées en Suisse :

- Propriétés à températures élevées : Mesure de la viscosité ou du comportement rhéologique (point de ramollissement, viscosité dynamique).
- Propriétés à températures intermédiaires : Mesure de la pénétrabilité à 25°C.
- Propriétés à basses températures : Mesure du point de fragilité Fraass.
- Vieillessement : Mesure du vieillissement à court-terme (essai RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test) ou à long-terme (essai PAV – Pressure Ageing Vessel).
- Fatigue : Mesure du comportement à la fatigue sur enrobé (Essais Flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales).

Les normes suisses et européennes [92][144] précisent des exigences et donnent des recommandations concernant les différentes propriétés des bitumes et liants bitumineux.

#### 2.4.6.2. Granulats minéraux

La durabilité des granulats par rapport aux conditions climatiques doit être déterminée afin de choisir les matériaux les plus adaptés parmi les différentes familles de granulats (granulats normaux [96][140], granulats légers [97][141], graves non traitées [101][103][142]). Pour ce faire la résistance au gel et au dégel de ces matériaux peut être déterminée selon différentes méthodes d'essais (examen pétrographique, absorption d'eau, essai de résistance au gel-dégel, etc.).

Les normes suisses et européennes précisent des exigences et donnent des recommandations concernant les différentes propriétés des granulats minéraux.

#### 2.4.6.3. Autres matériaux

D'autres matériaux pouvant être dépendant des conditions météorologiques sont employés de manières plus ou moins fréquentes (géosynthétiques, additifs, etc.). Il convient de mentionner tout particulièrement les géosynthétiques [105][139] qui doivent pouvoir résister aux conditions climatiques en place. Il existe des méthodes d'essai pour déterminer principalement le comportement à long terme de ces matériaux par rapport aux conditions météorologiques (résistance au vieillissement).

Les normes suisses et européennes précisent des exigences et donnent des recommandations concernant les différentes propriétés des géosynthétiques [102][145].

### 2.4.7. Réalisation des structures de chaussées

L'exécution des travaux de réalisation est à planifier lors de périodes adéquates, afin de garantir un compactage conforme aux prescriptions et une parfaite liaison entre les couches :

- Enrobés bitumineux [118] : Les enrobés bitumineux doivent être mis en place sur un support adéquat :
  - Couches de roulement : Support sec, donc en dehors de périodes pluvieuses, et températures du sol de support supérieures à +15°C.
  - Couches de liaison et de support de moins de 60 mm d'épaisseur : Support non recouvert d'un film d'eau et températures du sol de support supérieures à +10°C.
  - Couches de liaison et de support de plus de 60 mm d'épaisseur : Support non recouvert d'un film d'eau continu, support non gelé ou ramolli et températures de l'air supérieures à +5°C.
- Asphalte coulé [122] : Les asphaltes coulés doivent être mis en place sur un support sec, donc en dehors de périodes pluvieuses, et pour des températures du sol de support supérieures à 5°C. En outre, l'influence du vent doit être prise en compte lors de la mise en œuvre de l'asphalte.
- Enduits superficiels [91][117] : Les enduits superficiels doivent être mis en place sur un support sec, donc en dehors de périodes pluvieuses. En même temps il convient de réaliser ces enduits lors de la saison chaude (mi-mai à mi-septembre). La remise sous circulation doit également se situer dans cette saison.

#### **2.4.8. Couches traitées aux liants hydrauliques [104][123]**

Les couches de base et/ou de fondation traitées aux liants hydrauliques doivent être choisies pour résister spécifiquement à des conditions climatiques défavorables. Leur mise en œuvre et le choix des matériaux constituant ces couches dépendent entre autres des conditions météorologiques.

L'exécution des travaux de réalisation des couches traitées aux liants hydrauliques est à planifier lors de périodes adéquates, afin de garantir les exigences des normes :

- Les travaux doivent être interrompus en cas de précipitations,
- Et les températures de l'air et du support doivent être supérieures à 0°C.

S'il faut s'attendre à des températures  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ , les couches fraîchement posées doivent être protégées par des mesures adéquates. Elles seront également protégées contre le dessèchement (vent, chaleur) et le détrempeage (pluie) pendant le premier temps de la prise du liant (p.ex. émulsions bitumineuses, curing, SAMI).

Le type et les caractéristiques des liants, le type et les caractéristiques des granulats, etc. peuvent avoir des réponses bien distinctes envers les différentes conditions climatiques que l'on rencontre. Il convient donc de choisir les constituants en fonction des conditions climatiques d'un lieu donné.

#### **2.4.9. Caractéristiques de surface [95][124]**

L'adhérence est dépendante des conditions climatiques. En effet, des conditions défavorables (pluie, neige, etc.) peuvent provoquer une forte diminution de l'adhérence pneu-chaussée et ainsi augmenter le risque d'accident (aquaplaning, glissement sur la neige, etc.).

De même, les caractéristiques acoustiques d'une chaussée sont dépendantes des caractéristiques de surface, et ainsi des conditions météorologiques. En effet, le bruit de la circulation peut varier fortement selon les conditions climatiques rencontrées à un lieu. Aussi les mesures acoustiques sont influencées par ces conditions (voir Chapitre 2.4.15).

Les mesures des caractéristiques de surface (mesure de texture – profilomètre, méthodes volumétriques ; drainabilité – drainomètre ; qualité antidérapante : Skiddomètre, pendule SRT ; planéité – essai à la règle ; etc.) doivent être exécutées lors de conditions météorologiques favorables (aucune précipitation, températures adaptées aux différents types d'essais, etc.). Pour plusieurs caractéristiques mesurées, il convient en outre d'adapter les mesures en fonction de la température ambiante et/ou de la chaussée (pendule SRT, Skiddomètre, etc.).

#### **2.4.10. Signalisation et marquage**

La signalisation [133] et le marquage routier [134] doivent être conçus de manière à résister aux conditions climatiques, et peuvent être mis en place aux endroits à risque récurrents. Par exemple dans des régions avec brouillard fréquent, des signalisations ou marquages spéciaux peuvent être mis en place.

Les normes prescrivent les conditions climatiques auxquelles les signaux et marquages doivent résister et énumèrent les différents essais de vieillissement à appliquer. Les signaux sous forme de panneaux sont tout particulièrement vulnérables par rapport aux charges du vent, alors que les marquages sont plutôt sensibles aux températures et aux précipitations.

En même temps, les signalisations et marquages doivent être visibles en permanent. Par exemple, les feux de signalisation doivent pouvoir être vus quelque soit les conditions d'ensoleillement de l'endroit où ils sont installés.



#### **2.4.11. Systèmes d'évacuation des eaux de chaussée [116]**

Deux paramètres météorologiques interviennent dans le dimensionnement des systèmes d'évacuation des eaux de chaussée :

- Débits de pointes : Les débits de pointes sont caractérisés par des pluies de courte durée. Elles sont déterminées à l'aide des intensités des pluies (notion de temps de retour). La disposition et le dimensionnement des cheminées et grilles d'évacuation et des collecteurs sont basés sur les débits de pointes.
- Volumes d'écoulement : Les volumes d'écoulement sont caractérisés par des pluies de longue durée. Ils sont calculés sur la base de séries de pluies de longue durée. La disposition et le dimensionnement des installations de rétention et de traitement des eaux sont basés sur les volumes d'écoulement.

Des intensités de pluies locales réelles peuvent être employées pour la détermination des débits de pointes si les séries de données récoltées sont représentatives (longue période). Les normes suisses donnent aussi des intensités régionales moyennes, basées sur des mesures automatiques des précipitations sur le territoire suisse entre 1985 et 1995. Les débits de pointes sont caractérisés par des intensités mesurées à intervalle fixe, i.e. toutes les 5 minutes. Une durée de pluie de 15 min est utilisée dans le cas normal pour déterminer l'intensité.

Le choix du temps de retour a également un grand effet sur les intensités de pluies déterminantes. En effet, il permet de fixer la fréquence à laquelle la capacité du système d'évacuation des eaux de chaussée sera dépassée. Dans les normes suisses les intensités régionales moyennes sont données pour différents temps de retour (entre ½ à 20 ans). Dans le cas normal, un temps de retour de 1 année est choisi.

Le risque d'inondation des bords de la route et le déversement non contrôlé des eaux de chaussée dans les cours d'eau naturels et les terrains naturels doit être limité au maximum. Il convient tout particulièrement d'examiner le bon fonctionnement des systèmes en cas d'inondation.

#### **2.4.12. Gestion de l'entretien des chaussées**

L'entretien des chaussées est influencé de plusieurs manières par les conditions météorologiques :

- Dégradations de chaussées [135][136] : Les dégradations de chaussées sont fortement liées aux conditions, telles que la température ou l'humidité qui influencent directement l'apparition de dégradations diverses (orniérage, fissuration, etc.).
- Mesures d'entretien [130] : Les mesures d'entretien choisies doivent prendre en considération les conditions climatiques réelles du lieu, que ce soit pour le choix du type de mesure d'entretien (réparation, remise en état, renforcement, renouvellement) ou pour les caractéristiques de l'entretien (conception et réalisation des mesures d'entretien, choix des matériaux, etc.). Le renforcement d'une chaussée à l'aide de mesures de déflexion est un cas spécifique des mesures d'entretien (Chapitre 2.4.16).

#### **2.4.13. Entretien des routes – Service hivernal [131]**

Les conditions hivernales dictent les caractéristiques et les niveaux d'intervention du service hivernal (lieu, heure, durée, genre d'intervention). Le service hivernal a pour tâches d'enlever rapidement la neige des chaussées, de lutter contre la glissance hivernale, de fournir un service d'alerte pour les avalanches, etc., afin de garantir en tout moment la sécurité du trafic et la capacité des routes.

L'organisation du service hivernal repose largement sur une observation et une prévision des conditions météorologiques et une connaissance accrue du terrain (zones ombragées susceptibles de geler, zones à risque pour les avalanches, etc.). Les conditions météorologiques, telles que les températures, les précipitations, le rayonnement solaire, le vent, etc., doivent être suivies en continu

lors des conditions hivernales afin de procéder à un service "au bon moment". Pour ce suivi, les centres d'entretien disposent de systèmes d'aide à la décision (systèmes d'information météorologique de la route, installations de détection de verglas, etc.).

Les interventions du service hivernal peuvent se dérouler avant l'arrivée d'une condition hivernale défavorable (salage préventif, déclenchement artificiel des avalanches, etc.), pendant une condition hivernale (dénéigement des routes, salage, fermetures de voies, etc.), ou alors après une condition défavorable (dénéigement des trottoirs, préparation de la prochaine intervention, etc.). De même, différents outils ou moyens peuvent être employés pour le service hivernal : personnel du centre d'entretien, machines et matériel de déneigement et de salage, systèmes automatiques de déverglacage, systèmes de chauffage de chaussée, installations de mesure des conditions météorologiques routières, surveillance du réseau par caméras, etc.

Le réseau routier suisse est divisé en plusieurs degrés d'urgence, allant d'un degré 1 pour les routes à grand débit, les routes principales et autres routes importantes, à un degré 3 pour les routes secondaires (quartier, etc.). Selon le degré d'urgence d'une route, le service hivernal sera effectué de manière rapide et répétée (degré 1), ou alors sera effectué en dernière instance (degré 3). En même temps, le réseau routier est divisé en quatre niveaux de service, allant du niveau A pour un déneigement complet à un niveau D pour aucun service hivernal.

#### **2.4.14. Ecrans antibruit et anti-éblouissement**

La stabilité des écrans antibruit [90][129] et anti-éblouissement [93][128] doit être garantie, en particulier par rapport au vent.

Les écrans antibruit doivent être conçus de manière à résister à des vents importants. La charge aérodynamique spécifique est déterminée par des mesures de vitesses de vent réelles (vent avec un temps de retour de 50 ans) ou par des calculs basés sur des cartes nationales. De même, les écrans doivent être conçus de manière à résister à des températures allant de -30 à +70°C (calcul de déflexions). En outre, les charges verticales de neige réelles sont à appliquer pour les écrans non verticaux et les charges dynamiques dues au déneigement sont à considérer. L'impact d'autres paramètres climatiques sur les performances à long terme des écrans doit également être évalué (gel-dégel, rayons UV, humidité, etc.).

Les écrans anti-éblouissements doivent être conçus de manière à résister à des vents importants. Les normes européennes prescrivent des essais de résistance au vent pour un vent maximal fixé à 40 m/s (= 144 km/h). Les vents extrêmes réels mesurés à un endroit spécifique n'interviennent pas dans l'analyse de la résistance des écrans.

#### **2.4.15. Mesures acoustiques [90][106][127][129]**

Les mesures acoustiques in-situ varient fortement dans le courant d'une année en fonction des conditions climatiques. La température du revêtement et de l'air, la vitesse du vent ou encore l'état de surface que l'on rencontre pendant les mesures doivent être relevés. Ces paramètres doivent être pris en compte lors de la comparaison des résultats. Lors de campagnes de mesures acoustiques sur le long terme, l'on doit veiller à garder des conditions climatiques identiques.

Pour les mesures in-situ des différents indices acoustiques (indice de diffraction, indice de réflexion et indice d'isolation acoustique), les normes prescrivent des limites climatiques d'application des différentes méthodes :

- Etat de la surface sec (attention aux enrobés à forte porosité),
- Température de surface se situant entre 0 et 70°C,
- Vitesse du vent inférieure à 5 m/s,
- Température de l'air se situant entre 0 et 40°C.

#### **2.4.16. Mesures de déflexion [115][130][147]**

Les mesures de déflexion (FWD, poutre de Benkelman) varient fortement dans le courant d'une année en fonction des conditions climatiques et hydrologiques. La température du revêtement et la saison à laquelle les mesures sont effectuées doivent être relevées. Ces paramètres doivent être pris en compte lors de la comparaison des résultats et lors du renforcement d'une chaussée à l'aide de mesures de déflexion (correction de la température et de l'effet saisonnier). En même temps les mesures de déflexion ne doivent pas être effectuées lors de périodes de gel (faible déflexion) et de périodes de dégel (déflexion extrême).

#### **2.4.17. Gestion du trafic [132]**

La gestion du trafic prend en considération les conditions météorologiques régnant sur un réseau routier. Les normes suisses indiquent tout particulièrement des mesures de gestion du trafic à appliquer lors d'événements extraordinaires dus à des changements météorologiques soudains (neige, verglas, tempêtes, etc.) et à des événements ou catastrophes naturels (avalanches, inondations, etc.). Ces mesures doivent être appliquées dans le but d'assurer la sécurité et la fluidité des déplacements et d'augmenter l'efficacité du système des transports et le confort des usagers.

#### **2.4.18. Accidentologie [109]**

Les conditions météorologiques interviennent directement dans l'analyse des accidents de circulation routière. En effet, lors de chaque accident les conditions atmosphériques (précipitations, conditions de visibilité, etc.) sont récoltées afin d'évaluer leur impact sur l'accidentologie de manière statistiquement.

Des tronçons routiers à risque, p.ex. des tronçons avec une mauvaise évacuation des eaux de surface ayant engendré de multiples pertes de maîtrise des véhicules lors de périodes pluvieuses, peuvent de cette manière être détectés et des améliorations pour la route proposées.

#### **2.4.19. Capacité, vitesse et distance de visibilité**

Les conditions météorologiques ont une influence sur la capacité des infrastructures routières [108], la vitesse des véhicules [111] et la distance de visibilité des usagers [112]. Par exemple lors de périodes pluvieuses ou neigeuses, la capacité d'une route peut fortement diminuer. Néanmoins, la prise en compte de conditions réelles pour un endroit donné n'est pas normalisée et n'intervient donc pas dans les analyses de capacité au niveau de la Suisse.

Concernant le calcul des vitesses des véhicules des coefficients de frottement pneu-chaussée sont choisis pour le cas représentatif d'une chaussée mouillée. Néanmoins les conditions atmosphériques réelles ne sont pas non plus prises en considération pour effectuer une analyse des vitesses sur un tronçon donné.

Les conditions, telles que le brouillard ou la pluie, peuvent fortement diminuer la distance de visibilité. Néanmoins, la prise en compte de conditions réelles pour un endroit donné n'est pas non plus normalisée et n'intervient donc pas dans les analyses de distance de visibilité en Suisse.

## 2.5. Interaction entre différentes conditions météorologiques et des paramètres liés à la route

Les diverses conditions météorologiques (températures, rayonnement, précipitations, etc.) sont liées aux paramètres de la route de différentes manières. Un aperçu des interactions majeures est donné dans les chapitres ci-après (Chapitres 2.5.1 à 2.5.3).

### 2.5.1. La température du revêtement [8][15]

La température d'un revêtement est directement dépendante de plusieurs facteurs météorologiques pendant sa durée de vie. Principalement, il s'agit de la température de l'air et du rayonnement solaire, mais d'autres facteurs peuvent avoir une influence non négligeable comme le vent ou l'humidité relative du revêtement.

Il existe plusieurs modèles ou équations permettant d'estimer de manière indirecte la température d'un revêtement à différentes profondeurs en fonction de divers facteurs météorologiques. Ces modèles sont principalement basés sur des considérations théoriques par rapport à la théorie des flux de chaleur ou alors sur des équations empiriques. Concernant la théorie des flux de chaleur, celle-ci repose sur les quatre mécanismes de transfert de chaleur :

- Conduction : Transfert de chaleur avec contact lorsqu'un gradient de température au sein d'un système existe (phase solide).
- Rayonnement : Transfert d'énergie à travers le système sans matière par rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde dépend de la température du corps émetteur de chaleur.
- Convection : Transfert d'énergie par des mouvements macroscopiques de molécules dans un fluide (liquide ou gaz). La convection peut être soit naturelle (le transfert de chaleur provoque son mouvement par lui-même) ou forcée (le transfert de chaleur est forcé par un facteur provoquant le mouvement des molécules, p.ex. vent ou eau de ruissellement).
- Diffusion : Transfert de chaleur par mouvement de vapeur vers des zones à pression plus faible. La diffusion est responsable du phénomène d'évaporation.

Le phénomène de conduction est prédominant pour des températures allant jusqu'à 25°C, voir plus élevées si le sol est saturé. Le phénomène de convection devient plus important pour des températures positives et le phénomène de diffusion devient prédominant à hautes températures (>25°C) si le sol est peu saturé. Le phénomène de rayonnement n'intervient uniquement à des températures très élevées et ceci de manière secondaire.

Comme mentionné, il existe plusieurs modèles et équations pour l'estimation de la température dans un revêtement. Par exemple, le modèle issu du SHRP (Strategic Highway Research Program) est largement utilisé pour déterminer la gamme de températures à laquelle un revêtement peut être exposé. En Suisse, ce modèle a été adapté aux conditions locales pour la détermination de la température minimale et maximale des revêtements (Chapitre 6.2.2.1). D'autres modèles existent, utilisant différents facteurs météorologiques (Straub – 1968, Barker et al. – 1977, Holtslag et van Ulden – 1985, Marshall et al. (modèle BELLS) – 2001, Lavin – 2003, etc.).

La température d'un revêtement suit un cycle très similaire à celui de la température de l'air. Le cycle est presque identique pour la température de surface du revêtement, mais présente un décalage progressif pour une profondeur croissante. La variation de température est également plus faible pour des profondeurs plus importantes, allant jusqu'à une température constante à profondeur élevée (dans le sol et non dans le revêtement). Le rayonnement solaire a une influence marquée sur la température du revêtement. En effet, lors de journées très nuageuses ou pluvieuses la température du revêtement reste quasiment constante pendant la journée. D'autres facteurs

influencent également la température du revêtement tel que le vent (refroidissement de la surface du revêtement) ou les précipitations (refroidissement lors de fortes pluies, isolation thermique de la neige, etc.).

Un revêtement peut être sujet à une très large gamme de températures, lequel présente des effets mécaniques très divergents voir contradictoires selon la plage de température rencontrée. Les deux mécanismes principaux sont :

- Changement de la rigidité du revêtement : Un revêtement en enrobé bitumineux change de rigidité en fonction de la température (matériau thermosensible). En effet, un enrobé à température élevée est plus "mou" qu'à faible température.
- Création de contraintes et déformations : Des contraintes et déformations se forment au sein des revêtements en raison des dilatations-contractions thermiques lors de changements de température.

Ces mécanismes sont responsables des dégradations typiques des revêtements (fissuration, orniérage, etc.). L'impact de la température sur ces types de dégradation est discuté en détail dans le Chapitre 6.1.

### **2.5.2. Humidité et teneur en eau de la fondation [15]**

La teneur en eau d'une fondation, ainsi que l'humidité relative des matériaux composants la fondation, dépendent également directement des conditions météorologiques. Ces caractéristiques ont de leur côté une influence sur le comportement mécanique des routes (p.ex. rigidité d'une fondation).

La teneur en eau dépend principalement des caractéristiques du sol et du revêtement (teneur en vide, % de vides connectés, etc.) et de la nappe phréatique, mais les précipitations peuvent également influencer la teneur en eau d'une fondation. Cette influence peut par contre être très longue, étant donné que l'eau des précipitations doit traverser plusieurs couches de revêtement et/ou de sol avant de pénétrer dans la fondation. Un décalage entre le moment où une pluie a eu lieu et le changement de la teneur en eau dans la fondation a été détecté dans plusieurs recherches. Ce décalage pouvant être assez court (quelques jours), pour des routes non revêtues ou fortement fissurées, ou alors assez long (plusieurs mois), pour des routes neuves avec un revêtement étanche et sans fissurations.

La teneur en vide d'un revêtement est un facteur important pour l'infiltration de l'eau de pluie dans les couches inférieures des revêtements. Des teneurs en vide élevées et un grand pourcentage de vides communicants accélèrent fortement l'infiltration. De même, la fissuration peut être ou devenir un facteur prépondérant par rapport à l'infiltration. Le nombre de fissures et leurs dimensions influencent tout particulièrement le phénomène d'infiltration.

L'infiltration et le changement de la teneur en eau dans une fondation dus aux précipitations peuvent être estimés à l'aide de modèles divers. L'utilisation de modèles d'écoulements dans les sols par éléments finis est largement répandue. Ces modèles sont néanmoins très complexes lorsque des couches fissurées sont modélisées.

### **2.5.3. Phénomène de gel-dégel [15]**

Le phénomène de gel-dégel des routes, et principalement des fondations, a une influence directe sur le comportement mécanique des structures routières.

Ce phénomène fait intervenir deux conditions météorologiques principales qui sont la température et la teneur en eau des sols. Le changement de température autour de 0°C entraîne le phénomène de gel-dégel, qui, en présence d'eau, peut être dommageable à la route. Lors du refroidissement d'une fondation, l'eau contenue dans le sol a tendance à s'accumuler (phénomène de succion), de geler et d'augmenter ainsi la rigidité du sol. Lors du réchauffement, l'eau dégèle et fait diminuer la

rigidité du sol, entraînant une phase critique pour les fondations d'un point de vue mécanique. Des diminutions du module de rigidité des fondations pouvant dépasser les 50% ont pu être observées entre les périodes de dégel (principalement au printemps) et les périodes de gel (automne et hiver).

Les précipitations ont une influence sur la teneur en eau d'un sol de fondation (Chapitre 2.5.2), qui de son côté a un impact sur le phénomène de gel-dégel. Notons que les températures présentent une influence beaucoup plus directe que les précipitations, surtout pour des profondeurs élevées.

Il est largement acquis que le phénomène de gel-dégel joue un rôle prépondérant dans la durabilité d'une route. En effet, plusieurs types de dégradations se produisent principalement dans les périodes de gel-dégel (fissuration thermique, soulèvement du sol, etc.). La susceptibilité d'un sol vis-à-vis de ce phénomène est caractérisée par plusieurs facteurs, tels que la profondeur de gel, la gélivité des sols, etc. L'impact des conditions météorologiques sur le phénomène de gel-dégel est discuté en détail dans le Chapitre 6.3.

### 3. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans ce chapitre, tout d'abord une brève définition et description du phénomène de changement climatique est donnée, ainsi qu'un aperçu des causes de ce changement (Chapitre 3.1). Ensuite, un aperçu des différents types de conditions météorologiques est donné et la différence est faite entre les conditions moyennes et extrêmes (Chapitre 3.2). Par la suite, un aperçu des changements historiques des paramètres météorologiques moyens et extrêmes observés dans le monde est donné, et les impacts globaux du changement climatique sur l'environnement et la société sont brièvement décrits (Chapitre 3.3). La même démarche est ensuite réalisée pour le cas spécifique de la Suisse (Chapitre 3.4). Dans ce but, les différentes régions climatiques helvétiques sont décrites et les changements historiques des paramètres météorologiques moyens et extrêmes sont décrits en détail. De même, certains événements spécifiques, tels que la canicule de 2003, sont examinés, et finalement les impacts du changement climatique en Suisse sont évalués. A la fin de ce chapitre, la prévision et la modélisation du climat est discutée, aussi bien au niveau mondial, que plus spécifiquement au niveau de la Suisse (Chapitre 3.5).

#### 3.1. Définition du changement climatique

Le climat correspond à ce que nous appelons communément "le temps moyen". Il est décrit par les moyennes des grandeurs météorologiques et est déterminé pour une région donnée par l'interaction de courants atmosphériques à grande échelle (circulation) avec la topographie et la constitution du sol à l'échelle locale [70].

Le changement climatique correspond au phénomène de modification du climat "normal" qui s'est produit depuis le début de l'ère industrielle. Il se manifeste par une modification des conditions météorologiques générales et extrêmes au niveau global et régional (voir Chapitres 3.3 et 3.4). Il est de nos jours reconnu par une large majorité de la communauté scientifique que les causes du phénomène de changement climatique auquel nous assistons, seraient en majeure partie dues à l'activité humaine (combustion d'énergies fossiles, déforestation, activités industrielles et d'agriculture, aménagements du sol, etc.). Cependant, des causes naturelles auraient également une influence significative sur le phénomène de changement climatique (variations du rayonnement solaire, activités volcaniques, feux de forêts, variations des phénomènes climatiques particuliers (p.ex. El Niño-Southern Oscillation (ENSO)), etc.) [80].

La terre a déjà été sujette à de nombreux changements climatiques, tels que les ères de glaciations. Même si ces changements peuvent être décrits comme radicaux et rapides par rapport à l'histoire de notre planète, ceux-ci n'ont rien à voir avec le changement climatique auquel nous assistons actuellement. En effet, la rapidité du changement actuel dépasse largement toutes les périodes de changement historiques.

Certains scientifiques continuent à affirmer que le changement climatique serait un phénomène uniquement naturel et n'aurait de ce fait rien à voir avec les activités humaines [77]. Dans ce rapport, cette polémique n'est pas abordée.

Les causes humaines et naturelles ont des effets directs sur la concentration de gaz à effet de serre (GES) et de composants aérosols dans l'atmosphère et influencent le climat global. Le phénomène d'effet de serre est un phénomène naturel qui permet d'atteindre des températures de surfaces adaptées à la vie sur terre. Les gaz à effet de serre permettent de piéger dans l'atmosphère une

partie des rayonnements solaires réfléchis par la surface de la terre. Sans ses gaz, la température de surface serait insuffisante pour permettre la vie telle que nous la connaissons. Il existe plusieurs gaz à effet de serre, dont les plus importants sont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), les chlorofluorocarbures (CFCs), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Chacun de ces gaz a des caractéristiques distinctes (durée de vie, efficacité radiative, etc.) et des effets différents sur le climat [33].

Un accroissement important des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est constaté depuis le début de l'ère industrielle dû à l'activité humaine (Fig. 3.1). Ceci modifie le bilan radiatif de la terre, en piégeant d'avantage le rayonnement solaire réfléchi par la surface de la terre dans l'atmosphère.

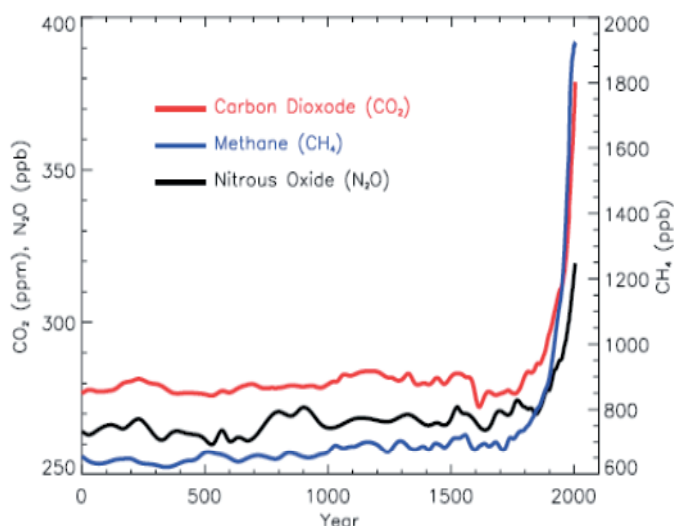


Fig. 3.1 – Accroissement de trois gaz à effet de serre entre 0 et 2010 [51][59].

L'augmentation de l'effet de serre a comme conséquence une modification des conditions météorologiques qui se traduit tout particulièrement par un accroissement de la température de surface de la terre. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est le plus important gaz à effet de serre et sa concentration actuelle dépasse de loin les amplitudes maximales rencontrées au cours des 650'000 ans passés (concentration en 2010 : 390 ppm ; concentration depuis 650'000 ans : 180 à 300 ppm selon mesures sur carottes de glaciers) [51][59].

D'un autre côté, les particules suspendues dans l'atmosphère libérées par les activités humaines (combustion d'énergies fossiles, activités industrielles, etc.) ou par des phénomènes naturels (volcans, feux de forêts, etc.), peuvent avoir, selon leurs caractéristiques (concentration, couleur, grandeur, etc.), soit un effet réchauffant soit un effet refroidissant du climat. Parmi ces composants aérosols les plus importants on trouve les sulfates ( $\text{SO}_4$ ), les nitrates, les suies et les poussières. Les sulfates permettent par exemple de réfléchir directement une partie des radiations solaires dans l'espace, ce qui se traduit par un effet refroidissant de la surface de la terre. Les suies d'un autre côté réagissent comme des gaz à effet de serre et ont un effet réchauffant sur la terre. Tous les aérosols ont, comparés aux gaz à effet de serre, une très courte durée de vie (quelques jours seulement).



### 3.2. Distinction entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes

Le climat correspond à une succession de conditions météorologiques, lesquelles sont décrites par des paramètres météorologiques. Il existe plusieurs paramètres météorologiques dont les principaux sont la température, la précipitation, l'ensoleillement, le vent, la pression et l'humidité. Une distinction peut être faite entre des conditions moyennes et extrêmes. Une condition météorologique peut être jugée comme extrême selon trois critères [45][70] :

- Rareté : Conditions qui se produisent à une fréquence/rythme faible. Il s'agit de conditions météorologiques avec des temps de retour (périodes de récurrence) élevés. Souvent, la rareté est décrite par des moyens statistiques. Par exemple, une canicule ou une inondation peut être une condition rare.
- Intensité : Conditions caractérisées par des valeurs très faibles ou très élevées des paramètres météorologiques (conditions avec un écart important par rapport à la moyenne, bien au-delà des fluctuations ordinaires). Toutes les conditions intenses ne sont pas forcément rares, par exemple des précipitations faibles présentent souvent un écart important par rapport à la précipitation moyenne, mais elles peuvent se produire souvent.
- Sévérité : Conditions qui se traduisent par de fortes pertes socio-économiques. La sévérité est un critère complexe car des impacts nuisibles peuvent se produire en absence d'une condition rare ou intense. Par exemple le glissement d'un terrain suite au dégel du sol peut avoir des conséquences dramatiques sur une localité.

Le choix des valeurs limites des paramètres permettant de distinguer entre une condition météorologique moyenne et une condition extrême est très délicat. Les valeurs sont spécifiques par rapport à un type de recherche effectué, aux conditions géographiques du site d'étude, à la perception du risque d'une société, à l'échelle spatiale considérée (locale jusqu'à mondiale), etc. La valeur limite peut aussi bien être une valeur concrète que l'on appelle seuil fixe (p.ex. température supérieure à 30°C) ou décrite par sa distribution statistique que l'on appelle seuil variable (p.ex. précipitation avec une intensité supérieure à 95% de toutes les intensités enregistrées) [65][70]. Le plus souvent, des indices sont utilisés pour décrire les conditions météorologiques extrêmes. L'organisation météorologique mondiale (WMO) a ainsi défini 27 indices par rapport aux températures et précipitations (par exemple Txx valeur mensuelle maximale des températures journalières maximales) [87].

L'augmentation de la valeur moyenne d'une distribution statistique d'un paramètre météorologique entraîne une augmentation des valeurs très élevées et une diminution des valeurs très basses. Néanmoins, la plupart des changements de paramètres météorologiques constatés montrent que non seulement la moyenne augmente, mais que la variabilité mesurée change également. Ceci a comme conséquence un changement des conditions extrêmes, qui sont caractérisées par les valeurs se situant aux extrémités d'une distribution (Fig. 3.2). Comme indiqué dans la figure, un changement de la distribution d'un paramètre météorologique (p.ex. températures) peut entraîner des changements substantiels des conditions extrêmes supérieures, mais avoir peu d'influence sur les conditions extrêmes inférieures. Certains paramètres sont plus difficiles à analyser (p.ex. précipitations) du fait de leur distribution non gaussienne.

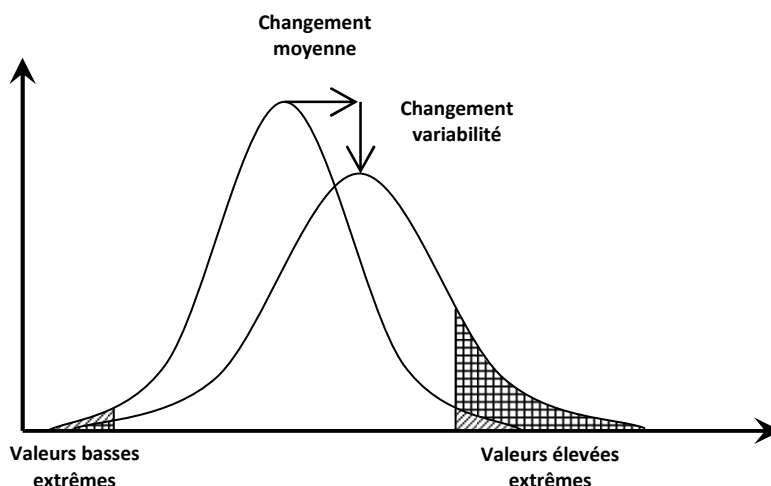


Fig. 3.2 – Changement de la moyenne et de la variabilité des paramètres météorologiques mesurés.

Pour la Suisse, plusieurs conditions extrêmes peuvent se présenter, telles que les extrêmes de température, la sécheresse, le gel, les incendies de forêts, les fortes précipitations, la grêle, les crues, les mouvements de masses, les avalanches et les tempêtes d'hiver. Ces événements peuvent être caractérisés selon leur rapport à des situations météorologiques spécifiques (courants atmosphériques, différences de pression, etc.) [70].

### 3.3. Changements observés du climat global

Un aperçu des changements historiques des paramètres météorologiques moyens et extrêmes observés dans le monde est donné dans ce chapitre, et les impacts globaux du changement climatique sur l'environnement, les êtres humains et la société sont brièvement décrits.

Afin de décrire les changements du climat il est nécessaire de distinguer deux notions distinctes :

- Période d'observation : Correspond à la période pendant laquelle des paramètres météorologiques sont analysés (quelques heures, plusieurs années, plusieurs centaines de milliers d'années, etc.). Les paramètres sont ensuite comparés par rapport aux données issues de la période de référence.
- Période de référence : Correspond à la période qui sert de référence à la comparaison avec la période d'observation. Quand on parle du changement climatique, trois périodes majeures sont employées : L'ère préindustrielle, la période 1961 à 1990 et la période 1991 à 2000. La période de l'ère préindustrielle correspond à une année spécifique et est habituellement située autour de 1850. Cette date est également employée en politique pour décider des objectifs détaillés (p.ex. limitation à +2°C de la hausse des températures d'ici 2100). Les périodes 1961 à 1990 et 1991 à 2000 sont souvent utilisées pour comparer des paramètres météorologiques mesurés par rapport à une période et non une date précise. Ceci a comme avantage de prendre en considération la variabilité des paramètres d'une année à l'autre.

Les changements observés des paramètres météorologiques ne sont pas exclusivement dus au changement climatique, des facteurs extérieurs peuvent également avoir une influence non négligeable sur ces paramètres. L'on peut mentionner [60] :

- Instrumentation : Le changement de types d'instrumentation ou de technique de mesure, d'emplacement des instrumentations ou d'exposition de ces emplacements peut influencer la plupart des paramètres météorologiques mesurés.

- Environnement des points de mesure : Le changement d'emplacement des points de mesure ou d'exposition de ces emplacements peut influencer la plupart des paramètres météorologiques mesurés. Tout particulièrement, l'effet de l'urbanisation sur les mesures de températures est à relever. Les villes ont en effet un impact "réchauffant" dû à l'absence de grandes surfaces naturelles. Cet effet reste néanmoins très localisé [59].
- Pas de mesure et méthodes de calcul : Le changement des pas de mesure (p.ex. toutes les 10min au lieu de toutes les 1h) et le changement des méthodes de calcul des moyennes et/ou extrêmes, peut également influencer tous les paramètres météorologiques mesurés.

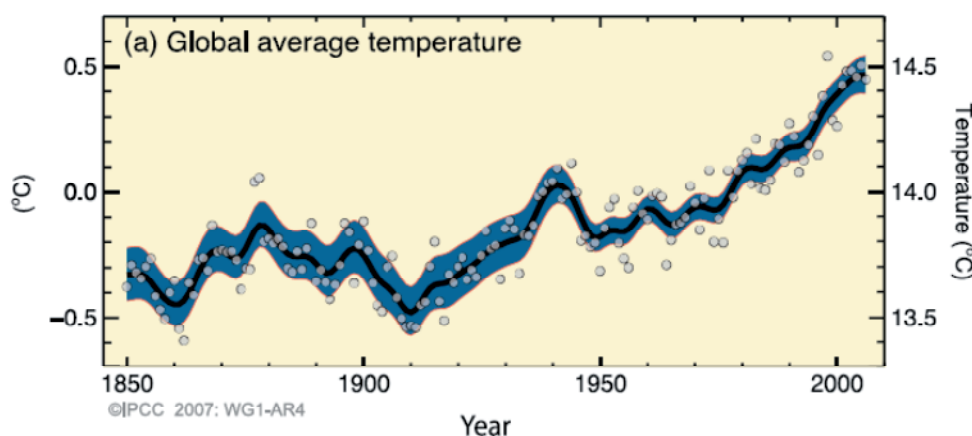
Quand on parle de changement du climat, il convient donc de prendre en considération ces facteurs extérieurs afin d'éviter toute fausse interprétation.

### 3.3.1. Températures

Lorsque l'on parle de changement climatique, le plus souvent, le changement des températures est mis en avant. Les températures ont en effet montrées des changements importants depuis l'ère préindustrielle, et ceci sur la totalité de la surface de la planète, mais pas forcément de manière uniforme.

#### 3.3.1.1. Températures moyennes

La température de surface globale moyenne a augmenté depuis l'ère préindustrielle (Fig. 3.3). Pendant le 20<sup>ème</sup> siècle, une hausse de +0.6°C (±0.2°C) a été constatée [38][59]. L'augmentation est plus marquée pour les dernières décennies, surtout depuis les années 1975. Si l'on considère la hausse de température pour la période 1955 à 2005, une hausse de +0.13°C (±0.03°C) par décennie est observée, ce qui correspond au double de l'augmentation moyenne pendant le 20<sup>ème</sup> siècle [59].



**Fig. 3.3** – Hausse de la température de surface globale moyenne entre 1850 et 2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 [59].

Si l'on considère la période de 2000 à 2009, 9 années sur 10 ont compté parmi les plus chaudes jamais enregistrées [69].

La hausse des températures n'est pas uniformément répartie dans le monde. En comparaison à l'hémisphère nord, une augmentation plus tardive a en effet été observée dans l'hémisphère sud, probablement due à la capacité de stockage de chaleur des océans plus nombreux [57].

De même, d'un continent à un autre, une augmentation générale des températures est constatée, mais les différentes périodes de hausse ou de baisse des températures ne sont pas forcément identiques. Par exemple la période 1945 à 1976 a été marquée par une baisse des températures pour la planète entière à l'exception de l'Australie et une partie de l'Asie, où la température a continué à augmenter [61].

Une hausse générale des températures sur les quatre saisons a également été constatée, aussi bien pour l'hémisphère nord que pour l'hémisphère sud. Au 20<sup>ème</sup> siècle l'augmentation de la température a été plus marquée en hiver et au printemps pour l'hémisphère nord alors que pour l'hémisphère sud, la hausse a été assez constante sur toute l'année [61].

Une augmentation des températures aussi bien pendant la nuit que pendant la journée a été observée. Si au début du 20<sup>ème</sup> siècle, la température nocturne augmentait davantage que la température journalière (diminution du DTR – Diurnal Temperature Range), ces dernières décennies, les hausses sont sensiblement pareilles pour les deux périodes journalières (DTR constant). Ces températures varient par contre fortement d'une région à une autre [59].

La température de surface sur terre ferme s'est réchauffée plus rapidement que la température sur océan. Dans les deux décennies 1981 à 1990 et 1991 à 2000, une augmentation de +0.27°C par décennie sur terre ferme et +0.13°C sur océan a pu être observée. L'océan joue un rôle important d'absorbeur et de lieu de stockage de la chaleur. En effet, les températures de l'eau sont également en continuelle hausse dans les océans de la planète [59].

### 3.3.1.2. Températures extrêmes

Lorsque l'on parle de températures extrêmes dans la littérature, les températures maximales et minimales, été-hiver et jour-nuit, sont considérées.

L'évolution des données de températures au cours du 20<sup>ème</sup> siècle indique globalement une augmentation du nombre de journées et nuits chaudes ainsi qu'une augmentation des températures lors de ces périodes. En même temps une diminution du nombre de journées et nuit froides et une augmentation des températures lors de ces périodes est constatée [36][59].

L'évolution de ces cas spécifiques est assez uniforme sur une année. En effet, les différentes saisons indiquent des tendances très similaires. Concernant la répartition géographique, certaines régions indiquent des tendances contradictoires par rapport à l'évolution globale. L'Europe compte parmi les régions les plus touchées concernant le changement de ces cas spécifiques. De même, à altitude plus élevée et à l'intérieur des continents, les phénomènes sont accentués (Fig. 3.4) [36][46].

En été, une augmentation de la fréquence d'apparition de canicules, de leurs rigueurs et de leurs durées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle a été constatée. De même, en hiver, une diminution de la fréquence d'apparition de périodes froides et de périodes de gel et de leurs durées a été observée [36][56][65].

Globalement, les températures journalières minimales ont augmentées d'avantages que les températures journalières maximales au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, ce qui concorde avec la diminution du DTR (Diurnal Temperature Range) observé. De même, les températures annuelles minimales ont présentées une hausse plus importante que les températures annuelles maximales. Ces dernières décennies les hausses sont néanmoins sensiblement pareilles [36][46][60].

Les changements asymétriques des extrêmes minimaux et maximaux, surtout observé en Europe, indiquent un changement potentiel de la distribution statistique des mesures de températures. En Europe, les températures minimales et maximales ont aussi d'avantage augmentées que les températures moyennes [36][46][65].

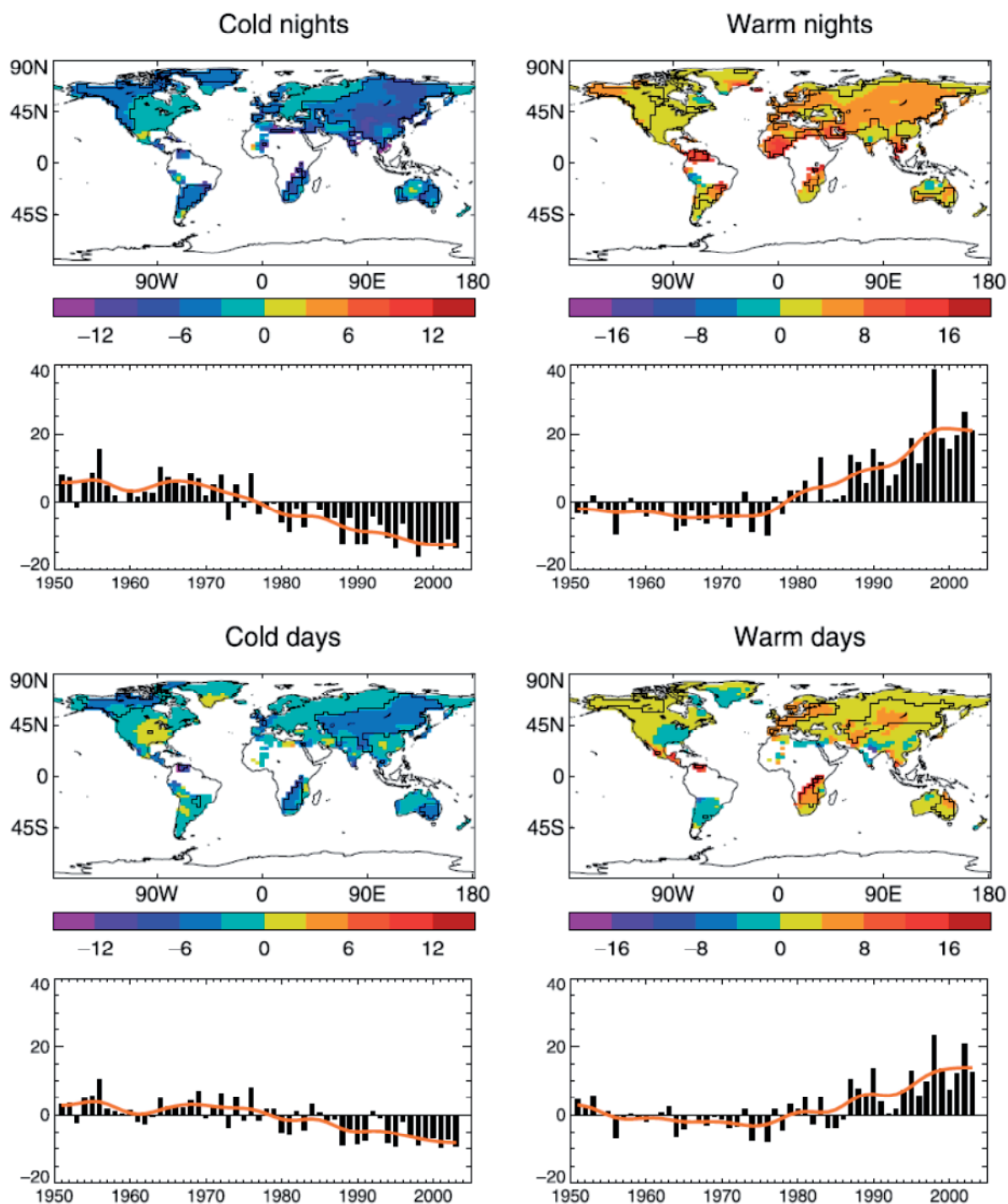


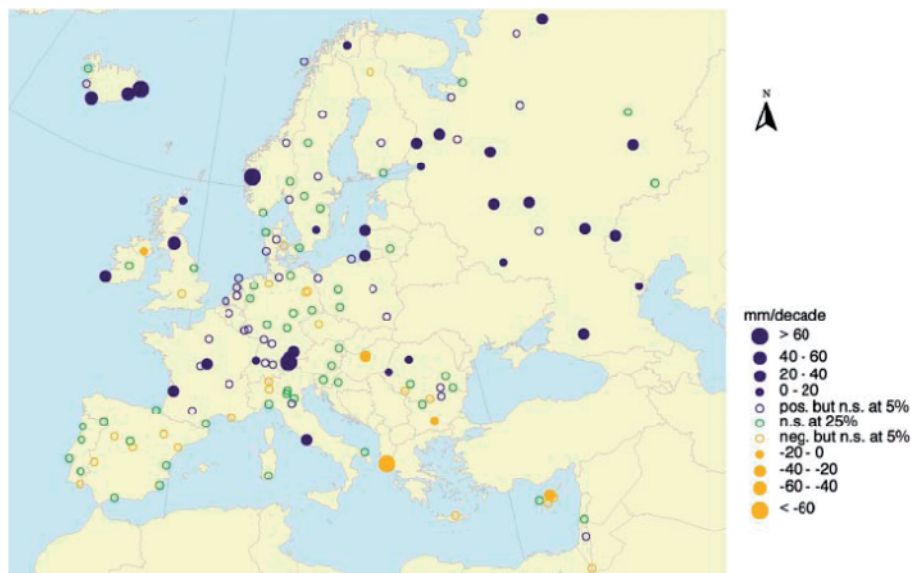
Fig. 3.4 – Evolution du nombre de journées/nuits chaudes/froides (seuils variables 10%/90%) par décennie entre 1950 et 2002 par rapport à la période de référence 1961-1990 [36].

### 3.3.2. Précipitations

Les changements des régimes et intensités de précipitations sont également mis en avant quand on parle de changement climatique. Les précipitations, sous forme de pluie ou de neige, ont en effet montré des changements non négligeables depuis l'ère préindustrielle, mais d'une manière plus spécifique par rapport aux différentes régions de la planète.

### 3.3.2.1. Précipitations moyennes

Les précipitations au cours du 20<sup>ème</sup> siècle ont montré des tendances à long-terme pour plusieurs régions de la planète. Une augmentation significative des précipitations a été observée pour plusieurs régions (nord de l'Europe, centre et nord de l'Asie, est de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud), alors que les précipitations présentent une diminution significative dans le Sahel, la Méditerranée, le sud de l'Afrique et le sud de l'Asie a été constatée (Fig. 3.5). Les précipitations sont fortement variables d'un point de vue spatial [59][65].



**Fig. 3.5** – Evolution des précipitations annuelles par décennie entre 1946 et 1999 en Europe par rapport à la période de référence 1961-1990 [65].

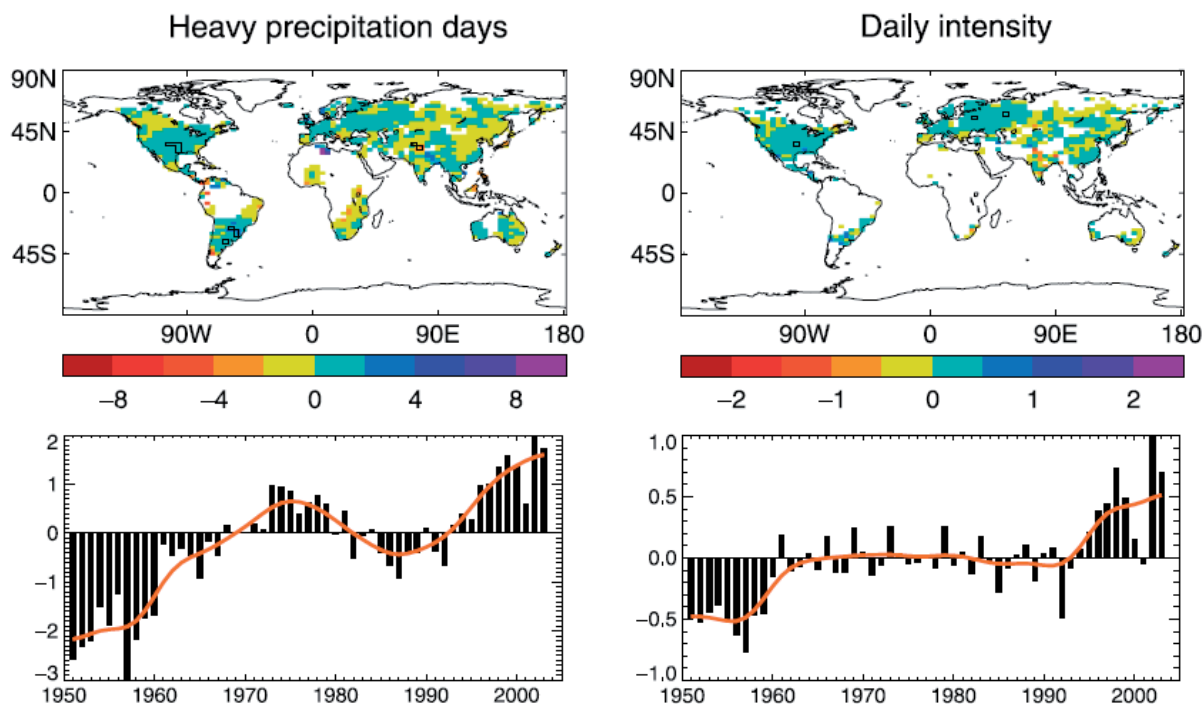
Les précipitations sont également fortement variables d'un point de vue temporel. Si les précipitations moyennes hivernales ont augmenté dans la plupart des régions atlantiques et du nord de l'Europe, les tendances estivales sont plutôt à la diminution [59].

Il existe de nos jours peu de recherches s'intéressant aux changements des régimes et intensités de précipitations au niveau global, car les précipitations sont surtout influencées par les conditions régionales ou locales. Ainsi, au niveau régional, les recherches sont beaucoup plus nombreuses (Chapitre 3.4.4.1 pour le cas spécifique de la Suisse).

### 3.3.2.2. Précipitations extrêmes

Lorsque l'on parle de précipitations extrêmes dans la littérature, les périodes très sèches (sécheresses, aussi bien en été qu'en hiver) et les périodes très humides (fortes pluie, fortes chutes de neige) sont considérées. Lorsque l'on parle de périodes de fortes précipitations, il faut prendre en considération l'intensité et la durée des événements. En effet, une forte précipitation peut soit être définie par une précipitation intense mais de courte durée (type orage) ou d'une précipitation moins intense mais de plus longue durée. Le premier événement peut par exemple provoquer des laves torrentielles, alors que le deuxième événement peut provoquer des inondations plus larges. Les orages peuvent également être accompagnés par de fortes vent ou de la grêle [70].

L'évolution des données de précipitations lors du 20<sup>ème</sup> siècle indique globalement une augmentation du nombre de périodes de fortes précipitations, une augmentation de l'intensité journalière des précipitations ainsi qu'une augmentation du nombre de périodes très sèches (Fig. 3.6). L'augmentation du nombre de fortes précipitations est même observée dans des régions où une diminution des précipitations annuelles est mesurée [36][52][59][65].



**Fig. 3.6** – Evolution du nombre de journées à fortes précipitations (>10 mm) et de l'intensité journalière par décennie entre 1950 et 2002 par rapport à la période de référence 1961-1990 [36].

Une augmentation des événements de fortes précipitations au cours du 20<sup>ème</sup> siècle a été constatée pour toutes les saisons et ceci surtout depuis les années 1950 [36]. Les tendances mesurées partout dans le monde indiquent bien la forte variabilité des précipitations extrêmes d'une région à l'autre. Même au niveau continental, de fortes différences peuvent exister sur des distances assez courtes (moins de 500 km) [65].

### 3.3.3. Autres paramètres météorologiques

La température et les précipitations (pluie, neige) sont les paramètres météorologiques les plus importants. Mais d'autres paramètres peuvent avoir un impact considérable sur la société et les être humains (vent, rayonnement solaire, etc.). Certaines conditions météorologiques spécifiques se composent également de plusieurs paramètres, telle que les orages (vent, pluie), le gel (température, précipitations), etc.

#### 3.3.3.1. Conditions moyennes

Le vent est un paramètre météorologique très sensible vis-à-vis du point de mesure. Sa variabilité spatiale, mais également sa variabilité temporelle, est très grande, ce qui rend les analyses des données de mesure très délicates. Il existe de ce fait, que très peu de recherches s'intéressant aux changements des régimes et intensités de vents mesurés de manière globale. Les recherches s'intéressent plutôt à des phénomènes plus restreints (niveau continental, national, local) [48].

Les changements des autres paramètres météorologiques (rayonnement, humidité, pression atmosphérique, brouillard, etc.) sont très peu décrits dans la littérature.

### 3.3.3.2. Conditions extrêmes

Les conditions extrêmes à mentionner se rapportent surtout au paramètre vent (rafale de vent, ouragans, tornades, etc.). Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, et surtout depuis les années 1970, une augmentation du nombre d'événements de ce genre et de leurs intensités a été constatée dans de nombreuses parties de la planète (surtout dans les parties extratropicales). De même, un déplacement vers le nord a été observé [59]. L'année 2008 fut par exemple une année record pour le nombre de tornades enregistrées aux Etats-Unis (environ 1500 tornades) [73].

Les cyclones tropicaux n'ont par contre pas montré d'augmentation significative de la fréquence d'apparition, mais une augmentation de leurs intensités et de leurs durées a été observée [59].

Ces événements très violents peuvent causer des dommages humains et matériels très importants.

### 3.3.4. Impacts globaux du changement climatique

Dans ce chapitre sont décrits les impacts globaux du changement climatique sur la société, les être humains, l'environnement, etc. L'impact plus spécifique du changement climatique sur le domaine du transport routier est abordé dans le Chapitre 4.

Les impacts dus au changement climatique sont nombreux. Certains sont dus au changement des conditions moyennes, mais la majorité est due au changement des conditions extrêmes [63]. Concernant les conditions extrêmes, il est souvent très difficile de savoir à quel point le changement climatique intervient dans ces phénomènes, car des conditions extrêmes ont toujours existées. Par la suite, un aperçu non exhaustif des impacts majeurs est décrit :

- Ecosystèmes : Montée du niveau de la mer [49][59], disparition ou déplacement de nombreuses espèces animales et végétales [49][72], désertification de plusieurs régions de la planète [49], changements des régimes de fleuves en altitude [49], apparition plus fréquente de feux de forêts dus à l'augmentation de périodes de sécheresse [59], diminution des calottes glaciaires et glaciers [59][73], intensification de l'acidification des océans due à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> [72], disparition du permafrost dans plusieurs régions (impacts sur les infrastructures, libération de méthane piégée dans le sol, mouvements de sols/roches, etc.) [59], montée de la limite des arbres [59], etc.
- Santé humaine : Apparition de maladies dans de nouvelles régions de la planète [59], accès plus difficile à l'eau potable (désertification, diminution de la couverture neigeuse/glaciaire, etc.) [49], augmentation du risque de famines [49], augmentation de la fréquence d'apparition de canicules [49], exposition accrue à des événements extrêmes (tornades, crues, etc.) [59], etc.
- Economie : Impacts sur le secteur touristique en altitude (diminution des conditions d'enneigement) et en régions côtières (montée du niveau de la mer) [59], impacts sur le secteur agricole [49], impacts sur les infrastructures dus à des conditions extrêmes plus nombreuses (tempêtes, tornades, crues, etc.) [49], prolongement des périodes de navigabilité dans les mers du nord et possibles nouvelles routes maritimes dans l'arctique [2][33], plus grand risque que des plateformes pétrolières offshore sont touchées par des événements extrêmes [33], etc.

Les impacts dus au changement climatique sont très variables d'une région à une autre. Si certaines régions sont carrément menacées de disparaître (petites îles de basse altitude), d'autres régions vont ressentir des effets positifs dus au changement climatique (climat plus agréables dans le nord).

La montée globale du niveau de la mer est l'un des impacts les plus importants. L'augmentation de la température globale moyenne provoque le dégel des calottes glaciaires et des couvertures neigeuses/glaciaires en altitude. En même temps l'augmentation de la température des océans implique une expansion thermique de l'eau qui accélère d'avantage la montée du niveau de la mer. La montée observée a été d'environ 1.8 mm ( $\pm 0.5$  mm) par an pour la période 1961 à 2003. Cette



montée s'est encore accélérée depuis les années 1990 (3.1 mm ( $\pm 0.7$  mm) pour la période 1993 à 2003) (Fig. 3.7). La montée n'est pas uniformément répartie dans le monde, en effet, il existe même certaines régions où le niveau de la mer a baissé ces dernières décennies. L'impact sur les régions côtières et les petites îles se ressent déjà de nos jours [49][59].

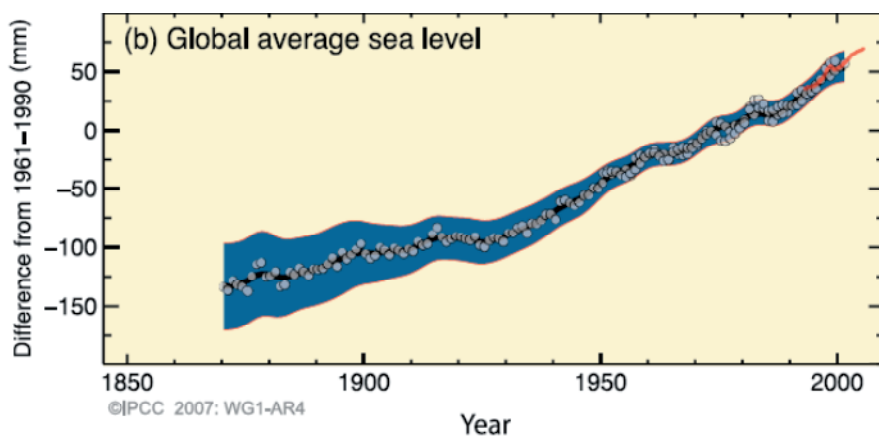


Fig. 3.7 – Niveau moyen de la mer entre 1870 et 2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 [59].

Les événements extrêmes peuvent causer des dommages humains et matériels très importants. Depuis les années 1970, les coûts liés aux conditions extrêmes ont littéralement explosés (Fig. 3.8). Cette évolution des dommages n'est par contre pas uniquement due au changement climatique, des changements de la société (augmentation démographique, construction de bâtiments dans des zones moins sûres, etc.) peuvent aussi jouer un rôle important [71].

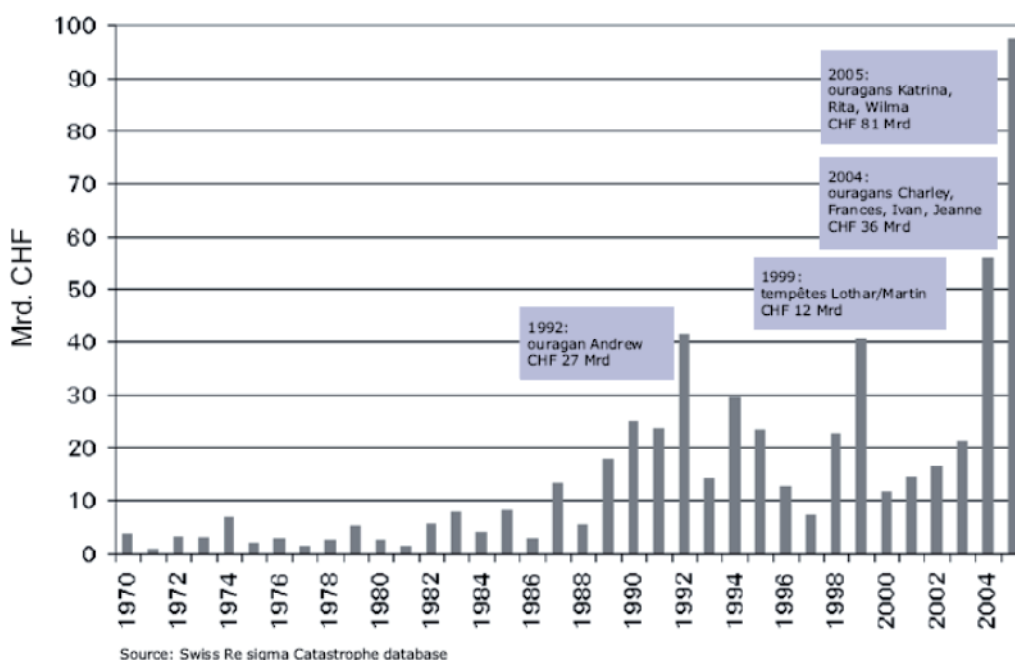


Fig. 3.8 – Evolution globale des dommages assurés causés par des catastrophes naturelles de type météorologique depuis 1970 [71].

### 3.4. Changements observés du climat en Suisse

La Suisse est également touchée par le changement climatique. Les tendances globales relevées antérieurement (Chapitre 3.3) se présentent également en Suisse, et ceci d'une manière plus marquée concernant certains changements de paramètres météorologiques (p.ex. augmentation deux fois plus importante des températures). Dans ce paragraphe, tout d'abord un aperçu des différentes régions climatiques en Suisse et de leurs caractéristiques est donné (Chapitre 3.4.1), puis les systèmes de mesure des paramètres météorologiques sont décrits (Chapitre 3.4.2). Par la suite, un aperçu des changements des paramètres météorologiques moyens et extrêmes observés est donné (Chapitres 3.4.3 à 3.4.5), et des événements spécifiques sont discutés (Chapitre 3.4.6). Finalement les impacts du changement climatique sur l'environnement, les être humains et la société sont brièvement décrits (Chapitre 3.4.7).

#### 3.4.1. Régions climatiques en Suisse

Le climat d'une région est déterminé par l'interaction entre les courants atmosphériques à grande échelle (circulation) et la topographie locale. En Suisse, c'est surtout le courant d'ouest au-dessus de l'Atlantique et de l'Europe qui influence le climat. La topographie des Alpes, et le fait de se retrouver à l'intérieur du continent européen joue également un rôle important. Surtout les Alpes peuvent, selon les courants, avoir une grande influence sur les déplacements des masses d'air (effet barrière). La Suisse reste de ce fait, une région climatique très complexe [43][70].

La Suisse peut être divisée en plusieurs régions climatiques. On retrouve presque toujours quatre grandes régions qui sont (Fig. 3.9) [42] :

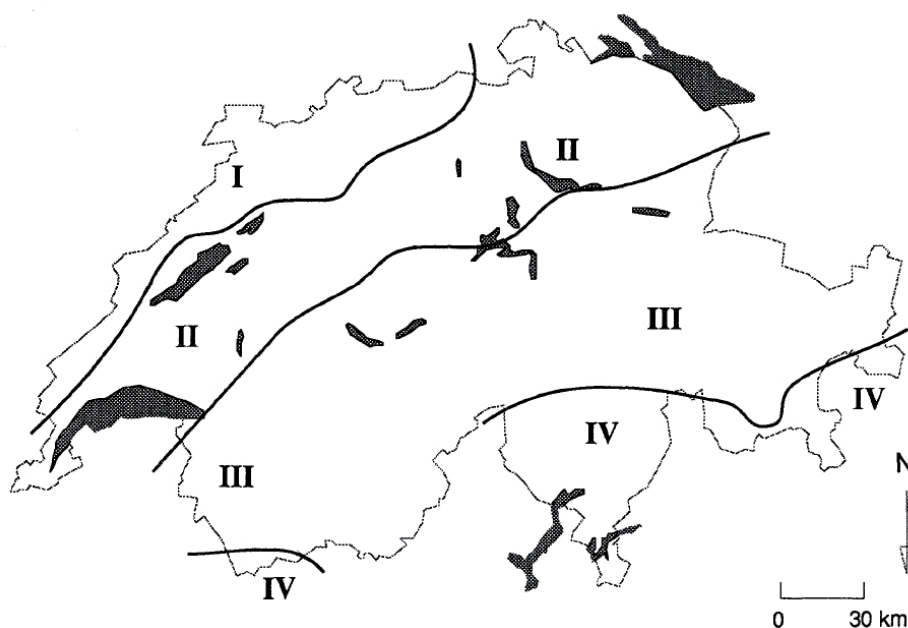


Fig. 3.9 – Carte des grandes régions climatiques en Suisse [42].

- Le Jura (I) : Région montagneuse d'une altitude moyenne de 1000 m avec plusieurs crêtes dépassant les 1500 m. Présence de plusieurs vallées impliquant des conditions météorologiques très spécifiques (p.ex. La Brévine).
- Le Plateau (II) : Région se situant entre le Jura et les Alpes, allant du lac Léman au lac de Constance. D'une altitude comprise entre 400 et 800 m, la topographie est plutôt plate avec la présence de nombreuses collines.

- Les Alpes (III) : Région montagneuse, occupant plus que 60% de la surface de la Suisse, se situant au sud du Plateau. Les Alpes se composent de plusieurs vallées principales, telles que le Valais, l'Oberland bernois, les Alpes centrales et les Grisons. Les altitudes varient fortement et plusieurs montagnes dépassant les 4000 m s'y trouvent.
- Le sud des Alpes (IV) : Régions se situant au sud des Alpes, composées principalement du Tessin, mais également de certaines régions des Grisons et du Valais, qui d'un point de vue climatique, sont plus proches des conditions que l'on retrouve au sud des Alpes.

Selon le degré de précision voulu, ces quatre régions climatiques peuvent être d'avantage divisées en sous-régions. Pour la présente thèse, une division plus poussée sera effectuée dans le chapitre 5 pour les différentes conditions météorologiques analysées.

### **3.4.2. Mesures des paramètres météorologiques en Suisse**

Le premier vrai réseau de mesure des paramètres météorologiques en Suisse (réseau "conventionnel") a été mis en place en 1863. A ce moment-là, des observateurs ont commencé à prélever, dans 88 stations de mesures, une multitude de paramètres (température de l'air, précipitations, etc.) et ceci à trois moments de la journée (matin, midi, soir) [38][39].

Par la suite, un nouveau réseau (réseau "synoptique") a été mis en place afin de faciliter l'échange international de données météorologiques. Ce réseau était principalement utilisé pour la prévision météorologique dans le domaine du trafic aérien. Les paramètres météorologiques étaient toujours prélevés manuellement par un observateur à différentes heures précises de la journée (5 à 8 prélèvements par jour) [39].

Finalement, à la fin des années 1970, le réseau "automatique" (ANETZ) a été mis en place. Ce réseau a remplacé petit à petit la plupart des stations du réseau "conventionnel" et "synoptique". Actuellement le réseau est composé de 72 stations de mesure, réparties sur tout le territoire de la Suisse. Les mesures des paramètres météorologiques y sont effectuées de manière automatique à des intervalles fixes (toutes les 10 min) [39].

Le réseau "automatique" de base (ANETZ) a par la suite été amélioré avec la mise en place de 44 stations complémentaires (réseau ENET), destiné principalement aux avertissements de vent et d'avalanche [67].

Depuis 2005, les différents réseaux encore en fonction sont en train d'être unifiés au sein d'un réseau automatique unique (SwissMetNet – SMN). Ce réseau sera composé de plus de 100 stations permettant d'analyser de manière uniforme tous les paramètres météorologiques relevés (Fig. 3.10) [67].

En parallèle, un réseau pluviométrique (réseau NIME) beaucoup plus dense existe. Ce réseau se compose d'une part de l'intégralité des stations du réseau automatique, et d'autre part de stations spécifiques où des mesures sont effectuées manuellement une fois par jour. Le réseau complet se compose de plus de 300 stations [39][67].

La Suisse possède plusieurs stations météorologiques situées à haute altitude (Jungfraujoch, Gornergrat, S. Bernardino, etc.). L'avantage de ces stations réside dans le fait qu'ils mesurent directement des conditions météorologiques de l'atmosphère et ne présentent pas de biais dus à la topographie ou l'exposition du site de mesure [42].



Fig. 3.10 – Carte des stations de mesure du réseau automatique SwissMetNet [67].

### 3.4.3. Températures

Les changements de températures observés en Suisse montrent en général une tendance semblable aux tendances globales déjà discutées (Chapitre 3.3.1). Par contre certaines différences existent, dues aux conditions locales spécifiques.

#### 3.4.3.1. Températures moyennes

La température de surface moyenne en Suisse (température mesurée à une hauteur de 2 m du sol) a augmenté deux fois plus vite que la moyenne globale. En effet, pendant tout le 20<sup>ème</sup> siècle une hausse de +1.4°C a été observée en Suisse, alors que la moyenne globale est de +0.6°C (±0.2°C). L’augmentation est encore plus marquée pour les dernières décennies, surtout depuis 1988. Si l’on considère la hausse de température pour la période 1974 à 2004, une hausse de +0.57°C par décennie est observée, ce qui correspond à quatre fois l’augmentation par rapport au 20<sup>ème</sup> siècle. En plus, les changements de températures observés en Suisse présentent une plus grande fluctuation d’une année à l’autre (Fig. 3.11) [38][79].

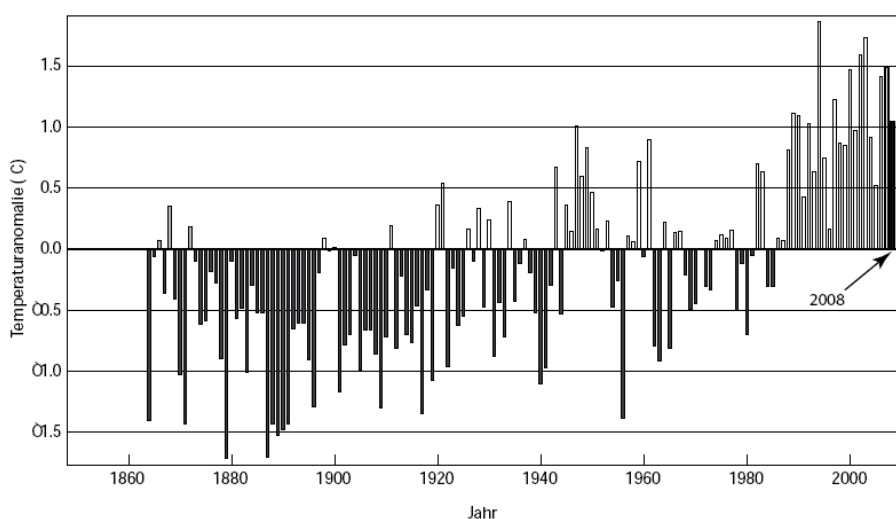


Fig. 3.11 – Variation de la température de surface moyenne entre 1864 et 2008 en Suisse par rapport à la période de référence 1961-1990 [73].

Concernant la saisonnalité, une hausse générale des températures moyennes sur les quatre saisons a également été constatée. Au 20<sup>ème</sup> siècle l'augmentation de la température a été assez uniforme d'une saison à une autre, avec un léger réchauffement plus marqué en hiver et automne (+1.0 à +1.3°C au printemps et en été ; +1.5 à +1.6°C en automne et en hiver) [38][79]. Par contre pour la période 1975-2004, l'augmentation a été plus marquée en été (+0.86°C par décennie) et au printemps (+0.84°C par décennie) par rapport à l'hiver (+0.38°C par décennie) et l'automne (+0.21°C par décennie) [40][79].

Jusqu'à la fin des années 1970, les températures hivernales moyennes restaient assez constantes, par contre par la suite, une forte accélération du phénomène de réchauffement hivernal a été constatée. Des hivers très froids ne se sont plus produits depuis le milieu des années 1960. Ceci a également provoqué une diminution des zones de permafrost en Suisse [38][54].

Les températures estivales moyennes ont pendant tout le 20<sup>ème</sup> siècle présentées des variations beaucoup plus importantes, mais ici aussi, à partir de la fin des années 1970, un réchauffement plus marqué a été observé [38].

La répartition géographique de la hausse des températures n'est pas uniformément répartie sur le territoire suisse. L'on peut noter un plus faible réchauffement dans le sud des Alpes, et ceci aussi bien en été qu'en hiver. En effet, pendant le 20<sup>ème</sup> siècle, la hausse de température moyenne se situait autour de +1.5°C au nord et +1.0°C au sud des Alpes. Cette hausse s'est par contre sensiblement équilibrée depuis les années 1980 [38][40][79].

Concernant l'altitude des stations de mesure, les recherches sur la hausse des températures observée sont moins concluantes. Des hausses de températures se sont produites aussi bien à basse qu'à haute altitude, mais si certaines recherches parlent d'augmentations assez semblables [38][40], d'autres parlent de hausses dépendant de l'altitude [79]. Pour ces derniers, à altitude élevée, une hausse plus importante des températures avec l'augmentation de l'altitude est constatée [79].

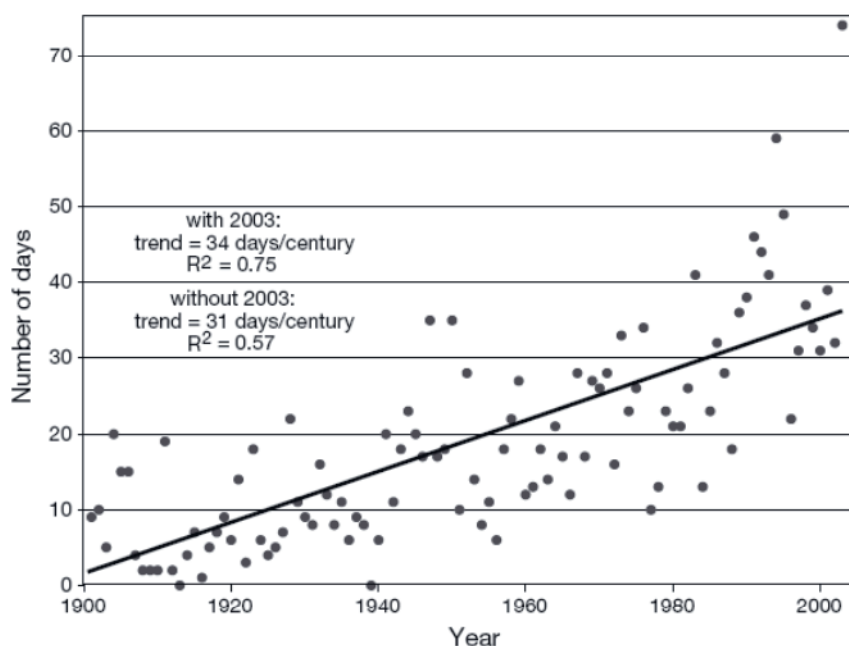
#### 3.4.3.2. Températures extrêmes

Comme pour les températures moyennes, l'évolution des données de températures pendant tout le 20<sup>ème</sup> siècle indique une augmentation du nombre de journées et nuits chaudes, avec augmentation des températures lors de ces périodes. En même temps une diminution du nombre de journées et nuit froides, avec augmentation des températures lors de ces périodes, est constatée [70][78].

L'évolution de ces cas spécifiques est de nouveau plus importante au niveau suisse qu'au niveau global. Notons que les étés les plus chauds au début du 20<sup>ème</sup> siècle étaient similaires aux étés les plus froids au début du 21<sup>ème</sup> siècle. En hiver, dans les Alpes, c'est surtout le nombre de journées/nuits chaudes qui a augmenté, alors qu'en plaine, c'est le nombre de journées/nuits froides qui a diminué [70][78].

En été, une augmentation de la fréquence d'apparition de canicules, de leurs rigueurs et de leurs durées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle a été constatée. De même, en hiver, une diminution de la fréquence d'apparition de périodes froides et de périodes de gel et de leurs durées a été observée [70].

Les températures annuelles minimales ont présentées une hausse plus importante que les températures annuelles maximales au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Par contre pour la période 1974 à 2004, la hausse est assez similaire entre les températures minimales et maximales [79].

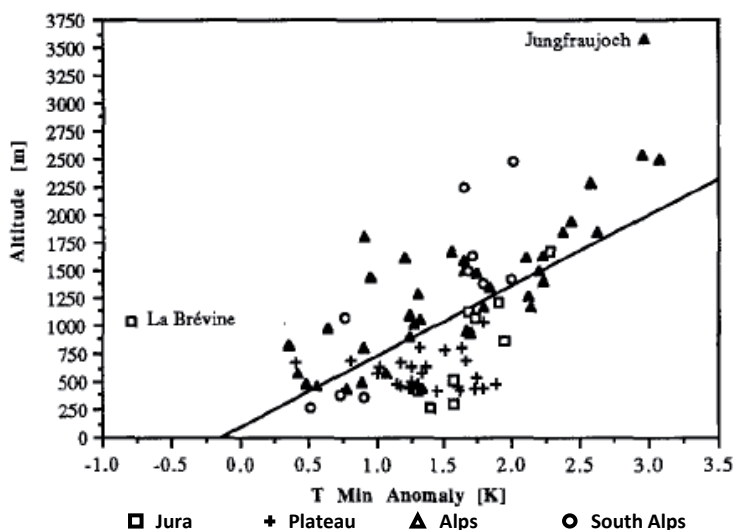


**Fig. 3.12** – Evolution du nombre de journées chaudes annuelles en hiver (seuil variable : température minimale >80%) pour la ville de Neuchâtel entre 1901 et 2003 [78].

Le même phénomène est constaté si l'on s'intéresse aux températures minimales et maximales pendant les quatre saisons. La hausse des températures extrêmes suit assez bien la hausse des températures moyennes (Chapitre 3.4.3.1), avec une hausse des températures minimales et maximales légèrement plus importante en hiver et automne pendant le 20<sup>ème</sup> siècle, et une augmentation plus importante lors du printemps et été pour la période 1974 à 2004 [70][79].

Les températures journalières minimales ont augmenté d'avantages que les températures journalières maximales au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, ce qui se traduisait par une diminution du DTR (Diurnal Temperature Range). En même temps, la variabilité jour-à-jour des températures a également diminuée, surtout pour les températures minimales en hiver [62][79].

Les anomalies des températures minimales et maximales sont dépendantes de l'altitude des stations de mesure. Concernant les températures minimales, une augmentation des anomalies positives des températures avec l'augmentation de l'altitude des points de mesure, est observée (Fig. 3.13). Ce phénomène semble néanmoins s'inverser lors d'hivers très chauds [42][62].



**Fig. 3.13** – Relation altitude-anomalies de températures pour les mois de janvier entre 1978 et 1992 [42].

Concernant la répartition géographique, une légère distinction peut être faite entre les régions au nord et au sud des Alpes. Mais le facteur géographique est moins important que le facteur altitude [42][62].

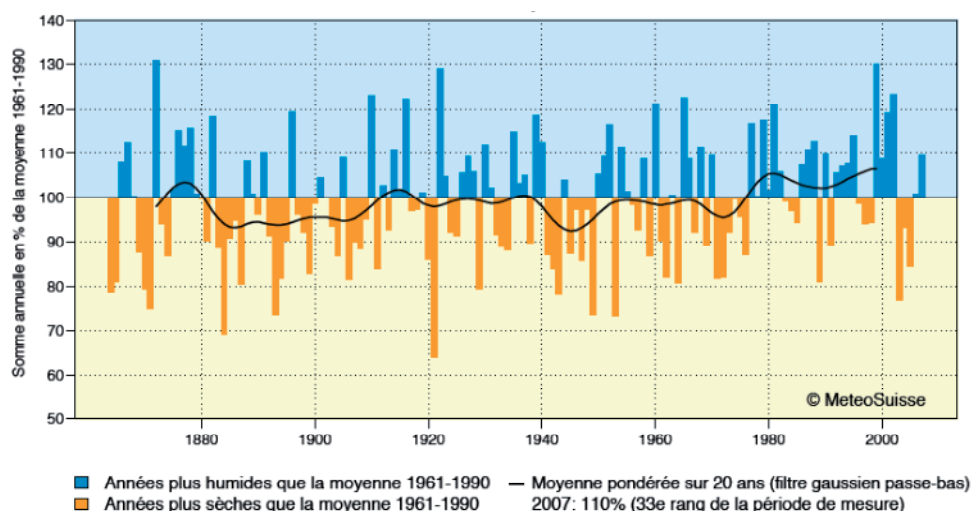
Les températures extrêmes en Suisse ont présentées des changements plus importants que les températures moyennes. En même temps, des changements asymétriques des extrêmes minimaux et maximaux ont été observés, indiquant un changement de la distribution statistique des mesures de températures [43].

### 3.4.4. Précipitations

Les changements des régimes, intensités et durées de précipitations observés en Suisse montrent des tendances très spécifiques par rapport aux conditions locales.

#### 3.4.4.1. Précipitations moyennes

Les précipitations ont montrées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle des variations d'une année à l'autre assez importantes. La tendance à long-terme pour la Suisse reste plutôt constante pour les précipitations annuelles moyennes, mais certaines régions indiquent des tendances positives significatives (Fig. 3.14) [40][72].



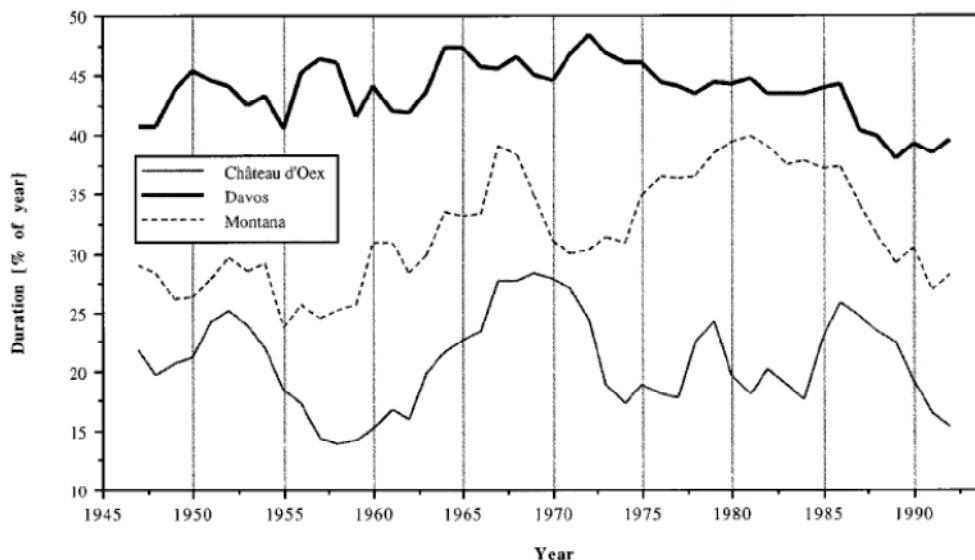
**Fig. 3.14** – Evolution de l'écart des précipitations annuelles moyennes entre 1864 et 2007 en Suisse par rapport à la période de référence 1961-1990 [72].

Les quantités de précipitations mesurées restent fortement variables d'un point de vue spatial. En effet, il peut y avoir de grandes différences d'une vallée à une autre, voire même au sein d'une même vallée. Ce phénomène est accentué dans les Alpes et le sud des Alpes, par contre sur le Plateau et au Jura, on peut assister à des variations plus faibles et des tendances plus nettes. En plaine et dans le Jura, on peut assister à une augmentation de la quantité de précipitations annuelles pendant le 20<sup>ème</sup> siècle, alors qu'au sud des Alpes la tendance va vers une diminution [38][40][72].

Par rapport aux saisons, les précipitations sont également fortement variables. Si les précipitations moyennes printanières et estivales ont plutôt montré des tendances constantes pour toute la Suisse pendant le 20<sup>ème</sup> siècle, les tendances automnales et surtout hivernales ont montré une tendance positive pour le Plateau et le Jura. Depuis les années 1970, une faible diminution des précipitations estivales a été observée [38][40][47][54][72].

En Suisse, les précipitations sous forme de neige sont abondantes lors des saisons froides. Les changements des quantités de neige, des intensités et des durées d'enneigement sont difficiles à évaluer, dus à la variabilité élevée de ces événements et dus à la forte dépendance de l'altitude des données observées. Pour les stations d'observation en altitude (à partir de 1300 m), on observe de la neige pendant quasiment toute la saison hivernale, il convient donc de s'intéresser aussi à l'épaisseur de la couverture neigeuse pour juger des changements de précipitations neigeuses [83].

Des tendances claires des précipitations neigeuses au cours du 20<sup>ème</sup> siècle ne sont pas observables, par contre depuis les années 1980, une diminution de la durée d'enneigement est constatée pour toute la Suisse. Cette tendance négative est surtout significative pour les régions à plus basses altitudes (Fig. 3.15) [44][83].



**Fig. 3.15** – Durée moyenne d'enneigement entre 1945 et 1994 pour trois stations alpines pour une épaisseur de neige supérieure à 10cm [44].

Il existe une assez bonne relation entre la durée d'enneigement et l'épaisseur de la couverture neigeuse, i.e. des longs hivers tendent à présenter des épaisseurs plus importantes, et ceci non seulement à cause de la plus longue période d'accumulation mais également à cause des précipitations plus intenses. Depuis les années 1980, on assiste donc également à une diminution des épaisseurs de la couverture neigeuse en Suisse [44].

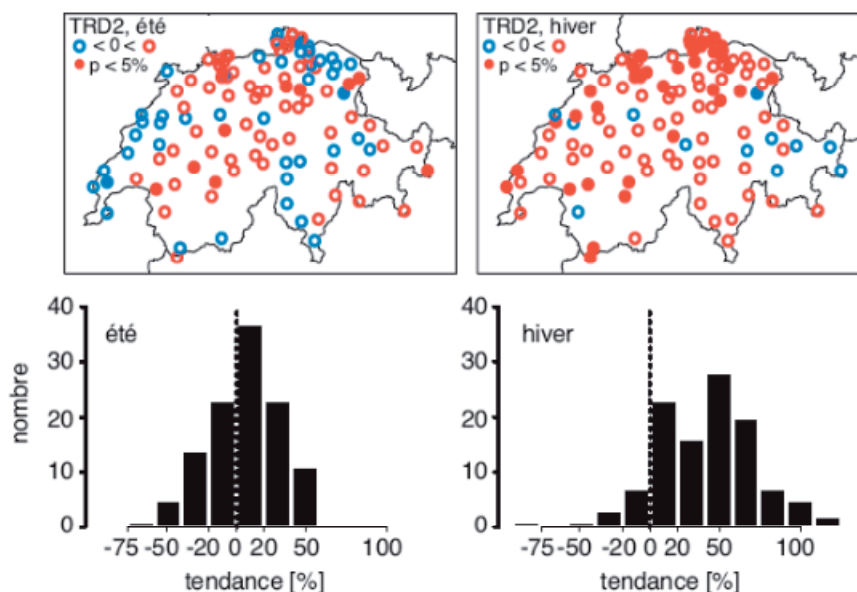
Il existe également une bonne relation entre les durées d'enneigement/épaisseur de la couverture neigeuse et les températures moyennes/précipitations moyennes. En effet, les années avec peu de neige peuvent être associées aux années avec des anomalies positives des températures et des anomalies négatives des précipitations [44].

#### 3.4.4.2. Précipitations extrêmes

La Suisse est également frappée par les événements de précipitations extrêmes (périodes sèches, fortes précipitations). Les périodes sèches ainsi que les périodes à fortes précipitations de longue durée (intensité moins élevée) peuvent se produire aussi bien en été qu'en hiver, alors que les événements de fortes précipitations à courte durée (intensité élevée) se rencontrent presque exclusivement lors des saisons chaudes [38][70].

L'évolution des données de précipitations au cours du 20<sup>ème</sup> siècle indique une forte densité d'événements de fortes précipitations pour toute la Suisse, avec une tendance indiquant une augmentation du nombre de tels événements, aussi bien en été qu'en hiver. La tendance positive sur tout le siècle est plus significative pour l'hiver (Fig. 3.16) [43][50].





**Fig. 3.16** – Evolution du nombre de journées à fortes précipitations en Suisse (seuil fixe : temps de retour de 30 ans) entre 1901 et 1994 pour l’hiver et l’été (en rouge : augmentation, en bleu : diminution) [70].

Depuis les années 1975, une augmentation accélérée des événements de fortes précipitations, en parallèle avec une augmentation des événements d’inondations et de crues, est observée, aussi bien en été qu’en hiver. Les tendances pour les saisons du printemps et d’automne sont moins marquées [38][50].

Une augmentation des précipitations journalières intenses ainsi que des précipitations intenses sur une plus grande période a été observée en Suisse. Les événements de précipitations avec de fortes intensités se produisent surtout lors des saisons chaudes (fin printemps à début automne). Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la période de fortes précipitations s’est allongée et débute plus tôt et se termine plus tard dans l’année. Alors qu’au nord des Alpes les périodes les plus critiques se situent en été, elles se situent plutôt en automne au sud des Alpes [38][50][70].

Depuis les années 1980, l’augmentation des événements à fortes précipitations s’est produite en parallèle à l’augmentation du nombre de périodes sèches et très sèches en Suisse. Ces périodes ont eu lieu aussi bien en hiver qu’en été, mais ont été plus nombreuses en hiver [43][50].

### 3.4.5. Autres paramètres météorologiques

Concernant les autres paramètres météorologiques (vent, rayonnement solaire, etc.), des changements spécifiques pour la Suisse ont également été observés.

#### 3.4.5.1. Conditions moyennes

Peu d’analyses des changements des conditions moyennes spécifiquement pour la Suisse ont été effectuées. L’on peut mentionner l’augmentation du rayonnement solaire, ou le changement des régimes de pression atmosphérique (plus de variabilité, augmentation de la pression) depuis les années 1980 [41]. De même, l’humidité relative montre une tendance à l’augmentation pour les régions alpines, tendance non retrouvée sur le Plateau suisse [75].

Les changements des autres paramètres météorologiques (vent, brouillard, etc.) sont très peu décrits dans la littérature.

### 3.4.5.2. Conditions extrêmes

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle la Suisse a été frappée par plusieurs événements extrêmes de type tempêtes (Vivian en 1990, Lothar en 1999, etc.). Néanmoins, la fréquence d'apparition de ces événements est plutôt à la baisse pour la Suisse [48].

### 3.4.6. Événements spécifiques

La Suisse n'est pas épargnée par des événements météorologiques spécifiques très extrêmes. Plusieurs de ces événements se sont produits ces dernières décennies, et le changement climatique semble avoir joué un rôle non négligeable dans l'apparition de ces phénomènes. Ces événements très violents peuvent avoir des conséquences très néfastes sur les êtres humains et la société et causer des dommages humains et matériels considérables.

Un aperçu de certains des événements les plus marquants est donné ci-après [27][38][48][50][74] :

- Inondations dans la vallée de la Reuss et au Tessin ; coulée de boue à Poschiavo en août 1987.
- Tempête Vivian en février 1990.
- Crues à Saas et à Brigue en septembre 1993.
- Inondations au Tessin en octobre 1993.
- Incendies de forêt au Tessin et dans le Mesocco en avril 1997.
- Coulée de boue à Sachseln en août 1997.
- Avalanches à répétition en février 1999.
- Inondations dans de nombreuses régions du Plateau en mai 1999.
- Tempête Lothar en décembre 1999 (Chapitre 3.4.6.1).
- Hiver très chaud 2000/01.
- Coulée de boue à Gondo, intempéries au Tessin en octobre 2000 (Chapitre 3.4.6.2).
- Coulée de boue à Schlans, intempéries aux Grisons et au Tessin en novembre 2002.
- Canicule et sécheresse pendant l'été 2003 (Chapitre 3.4.6.3).
- Inondations dans de nombreuses régions du Plateau et des Préalpes en août 2005.
- Printemps extrêmement chaud dans toute la Suisse en 2007.
- Inondations sur le Plateau suisse en août 2007.

Dans les chapitres à suivre, quelques uns de ces événements sont décrits plus en détail.

#### 3.4.6.1. Lothar 1999

Lothar était une tempête extrême qui selon les lois statistiques, présentait un temps de retour de plus de 100 ans pour presque la totalité des stations de mesure au nord des Alpes. Il s'agissait également d'un événement très large touchant non seulement une grande partie de la Suisse (à l'exception du Tessin et des Grisons), mais également les pays voisins de la Suisse [48].

Lothar était extrême d'un point de vue de l'intensité des vents mesurée, avec des rafales atteignant 50 m/s dans la région de Brienz, mais aussi à cause de son extension spatiale plus importante que pour les tempêtes plus faibles [48].

#### 3.4.6.2. Coulée de Gondo 2000

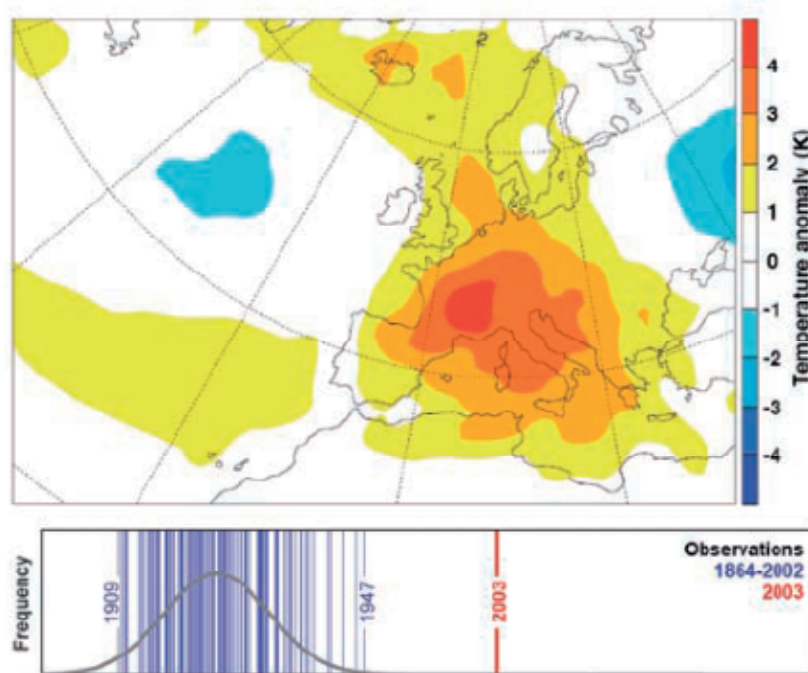
En octobre 2000, des précipitations exceptionnelles ont balayées le sud des Alpes, déversant entre 700 et 900 mm de pluie en cinq jours, dont 400 mm en 36 heures. Les fortes précipitations, accentuées par le ruissellement important sur la falaise où se situe le village de Gondo, ont provoqué un tel flux d'eau souterraine que le terrain a été emporté par les forces de percolation. Le village, situé au pied d'une haute falaise, a été touché de plein fouet par la coulée.

La coulée a balayé plusieurs maisons sur son passage et causé la mort de 14 personnes. La route du Col du Simplon a été coupée pendant plus d'une semaine. Des pluies avec une telle intensité n'avaient jamais été observées jusqu'ici et selon les lois statistiques, un tel événement devait avoir un temps de retour supérieur à 1000 ans [27].

### 3.4.6.3. Canicule 2003

L'année 2003 a été marquée par une période estivale exceptionnellement chaude due à des régimes climatiques extrêmes. Cet événement avait des répercussions considérables sur l'environnement et les êtres humains d'une grande partie de l'Europe [37][59].

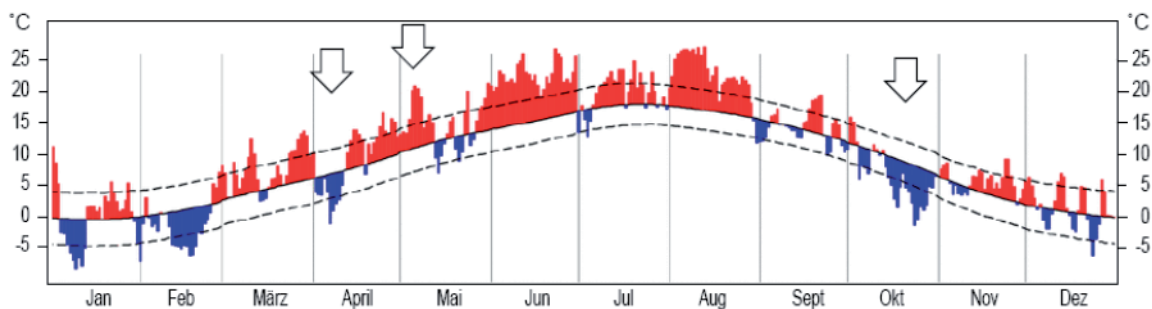
L'amplitude extrême de cet événement avait comme conséquence que l'été 2003 correspondait de loin à l'été le plus chaud depuis plus que 2500 ans. En Europe, les températures estivales présentaient une anomalie positive de  $+3.8^{\circ}\text{C}$  par rapport à la moyenne 1961 à 1990, rendant l'application d'une loi normale non adaptée (Fig. 3.17). Surtout le mois de juin ( $+6$  à  $+7^{\circ}\text{C}$  de la température mensuelle moyenne) et le début du mois d'août ( $+7^{\circ}\text{C}$  pour la période du 1<sup>er</sup> au 13<sup>ème</sup> août) étaient particulièrement chauds. Le mois de juillet était également plus chaud, mais moins marqué ( $+1$  à  $+3^{\circ}\text{C}$ ) [47][59].



**Fig. 3.17** – Comparaison des températures estivales pour l'été 2003 en Europe par rapport à la période de référence 1961-1990 [59].

La Suisse se trouvait au cœur de cet événement extrême. L'été 2003 correspond à l'été le plus chaud jamais observé, avec des longues périodes de chauds et des températures maximales extrêmes. La température estivale moyenne en 2003 se situait largement au-dessus des moyennes estivales normales ( $+4.0$  à  $+5.5^{\circ}\text{C}$ ). Les étés les plus chauds ont été dépassés de  $+2$  à  $+3^{\circ}\text{C}$  [37][78][88].

Les mois de juin et août étaient particulièrement chauds en Suisse, et correspondaient aux mois les plus chauds jamais mesurés en Suisse. En juillet les températures étaient également au-dessus de la moyenne, mais d'une manière moins marquée. Au début du mois d'août, on assistait à un retour d'une période très chaude, avec des extrêmes considérables (Fig. 3.18). A cet instant, la température extrême maximale absolue a également été mesurée en Suisse : une température de  $41.5^{\circ}\text{C}$  a été observée le 13 août à Grono dans les Grisons ( $+2.5^{\circ}\text{C}$  par rapport à l'ancien record mesuré à Bâle en 1952). En même temps, les températures extrêmes minimales se situaient largement au-dessus de la moyenne [37][78][88].



**Fig. 3.18** – Comparaison des températures journalières à Zurich pour l'année 2003 par rapport à la période de référence 1961-1990 [37].

D'un point de vue statistique, l'été 2003 correspondait à un événement très peu probable. En effet la température estivale moyenne en 2003 était jusqu'à cinq fois supérieure à la déviation standard des températures estivales moyennes en Europe. Pour la Suisse, un temps de retour de 9000 ans a été calculé pour les températures estivales 2003 [37][59].

Les températures extrêmes pendant l'été 2003 étaient accompagnées par un déficit de précipitations qui a duré presque toute l'année 2003, un ensoleillement plus marquée et une présence diminuée de la couverture nuageuse [37][59][76].

Les impacts sur l'environnement, les êtres humains et la société étaient nombreux. Voici quelques uns des impacts majeurs observés en Suisse :

- Smog estival : Le nombre d'heures où la concentration d'ozone dépassait la valeur limite de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  était environ deux fois plus élevée que la moyenne 1988 à 2004. En même temps la concentration en poussière fine était très élevée [71][76].
- Taux de mortalité : Augmentation du taux de mortalité durant l'été 2003 (jusqu'à 35'000 morts supplémentaires en Europe, 1000 morts supplémentaires en Suisse) due aux températures extrêmes et au smog estival [59][88][76].
- Récoltes agricoles : Diminution des récoltes agricoles (jusqu'à 30% en Europe) due aux températures extrêmes et au déficit de précipitations [59].
- Feux de forêts : Plusieurs feux de forêts importants se sont déclarés durant l'été 2003 dus aux températures extrêmes et au déficit de précipitations [59].
- Cours d'eau et lacs : Niveaux bas record pour plusieurs rivières et lacs en Suisse et en Europe dus aux températures extrêmes et au déficit de précipitations. Réchauffement important des températures des cours d'eau et lacs en Suisse avec impact négatif sur la faune aquatique [59][76].
- Glaciers : Perte de masse et de volume importante des glaciers suisses due aux températures extrêmes [76].
- Eboulements : Nombreux éboulements survenus principalement en haute altitude dans des zones de permafrost (4 à 6% de la superficie de la Suisse) [76].

Les modélisations des conditions météorologiques futures indiquent que l'été 2003 pourrait correspondre à un été moyen à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Chapitre 3.5.2) [59].

L'année 2003 n'était pas seulement unique à cause de la canicule estivale, mais également à cause de certains autres événements extrêmes qui se sont produits lors de cette année. L'on peut mentionner un février très froid (le plus froid depuis 1986) et avec beaucoup de neige, un début de mois d'avril avec des températures extrêmes minimales et de la neige jusqu'en plaine, un changement très rapide fin avril de températures faibles à des températures élevées, des précipitations intenses au mois d'octobre, un changement radical vers des températures hivernales

fin octobre (seulement un mois après le dernier jour avec des températures élevées extrêmes), de la neige jusqu'en plaine en octobre (dans certaines régions ce phénomène n'a plus été observé depuis plus que trois décennies, etc. D'un point de vue de la température moyenne annuelle, 2003 était la deuxième année la plus chaude, après celle de 1994 (Fig. 3.18) [37][76].

Tous ces phénomènes et événements ont montré que la variabilité des régimes climatiques a fortement augmentée [37].

### **3.4.7. Impacts du changement climatique**

Par la suite sont décrits les impacts au niveau suisse du changement climatique sur la société, les être humains, l'environnement, etc. L'impact plus spécifique du changement climatique sur le domaine du transport routier est abordé dans le Chapitre 4.

Les impacts au niveau suisse du changement climatique sont nombreux et similaire aux impacts au niveau global. Certains sont dus au changement des conditions moyennes, mais la majorité est due au changement des conditions extrêmes. Concernant les conditions extrêmes, il est souvent très difficile de savoir à quel point le changement climatique intervient dans ces phénomènes, car des conditions extrêmes ont toujours existées. Par la suite, un aperçu non exhaustif des impacts majeurs est décrit :

- Ecosystèmes : Disparition ou déplacement de nombreuses espèces animales et végétales [59], changement des régimes de fleuves en altitude (impacts sur production d'énergie hydraulique) [49], apparition plus fréquente de feux de forêts dus à l'augmentation de périodes de sécheresse [59], retrait et disparition de glaciers [54][59], diminution des périodes d'enneigement [59], disparition du permafrost dans plusieurs régions (impacts sur les infrastructures, mouvements de sols/roches, etc.) [59], montée de la limite des arbres [59], etc.
- Santé humaine : Augmentation de la fréquence d'apparition de canicules [49], exposition accrue à des événements extrêmes (tempêtes, crues, etc.) [59], augmentation de la pollution de l'air, etc.
- Economie : Impacts sur le secteur touristique en altitude (diminution des conditions d'enneigement) [59], impacts sur le secteur agricole [49], impacts sur les infrastructures dus à des conditions extrêmes plus nombreuses (tempêtes, crues, etc.) [49], changement de la consommation d'énergie (systèmes de refroidissement en été) [79], etc.

Les impacts dus au changement climatique restent très variables d'une région à une autre, surtout si l'on considère les Alpes et la plaine en Suisse.

## **3.5. Prévision et modélisation climatique**

Afin de prévoir le climat dans un futur proche ou lointain, il est nécessaire de recourir à des outils de prévisions climatiques. Ces outils peuvent se composer de modèles statistiques (prévision statistique) ou alors de moyens de modélisation du climat. Ce sont principalement ces derniers qui sont utilisés de nos jours.

Il convient de distinguer clairement entre les prévisions climatiques et les prévisions météorologiques. En effet, ces dernières prévoient la "météo" journalière permettant de décrire des valeurs plutôt précises des conditions météorologiques générales (températures, précipitations, vent, etc.). Les prévisions météorologiques restent très incertaines déjà pour des prévisions à courte terme (quelques journées). Les prévisions climatiques décrivent un état moyen du climat sur une longue période. Cet état moyen prend en considération les conditions météorologiques moyennes et extrêmes et compense leurs fluctuations importantes.

Dans la suite de ce chapitre est donné un aperçu du thème de modélisation des conditions météorologiques (Chapitre 3.5.1), puis les prévisions des conditions météorologiques au niveau global (Chapitre 3.5.2) et suisse (Chapitre 3.5.3) sont décrites plus en détail.

### **3.5.1. Modélisation des conditions météorologiques**

La modélisation du climat et des conditions météorologiques est un procédé compliqué faisant intervenir une multitude de facteurs. Les deux facteurs principaux, qui sont décrits dans la suite de ce chapitre, sont les scénarios décrivant les changements futurs des paramètres extérieurs (Chapitre 3.5.1.1) et les modèles eux-mêmes (Chapitre 3.5.1.2 et 3.5.1.3).

#### *3.5.1.1. Scénarios*

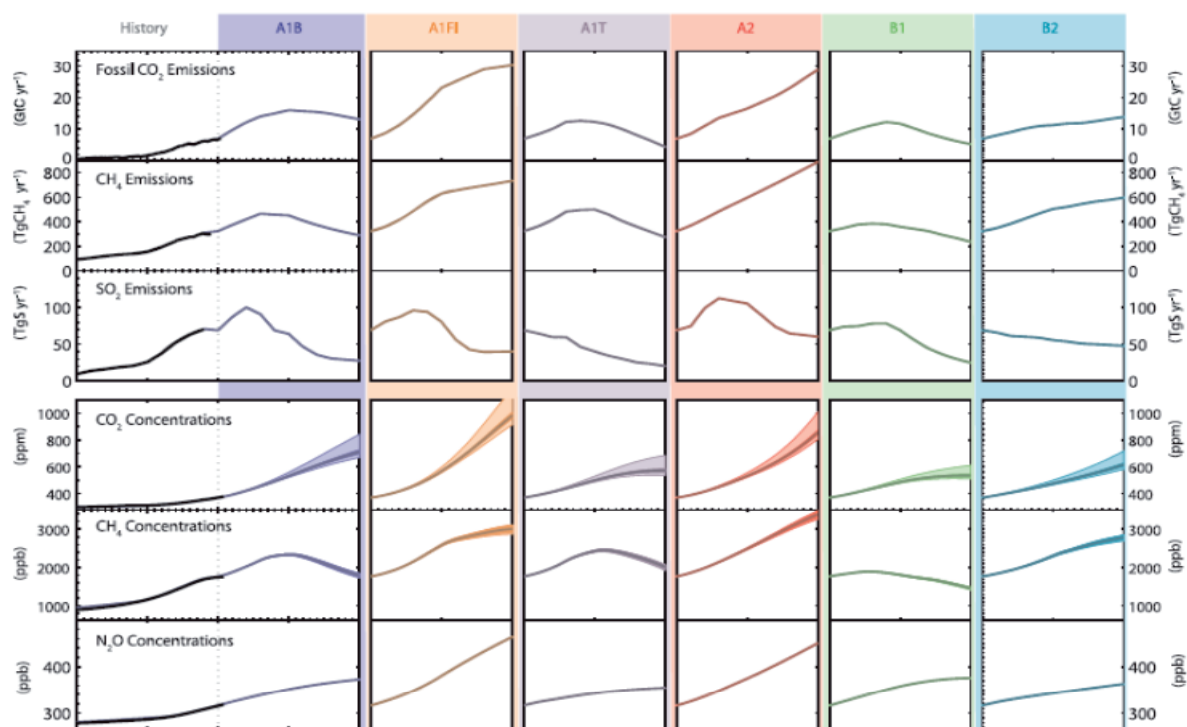
Les scénarios permettent de décrire une évolution de certains paramètres (émissions, conditions extérieures, etc.) et sont utilisés pour être implémentés dans les modèles statistiques et climatiques. Concernant les modèles statistiques, les scénarios sont basés sur l'évolution passés des conditions météorologiques (température, précipitations, etc.), puis reporté dans un futur en se basant sur des considérations statistiques et probabilistes (Chapitre 3.5.1.2).

Concernant les modèles climatiques, les scénarios décrivent une probable évolution dans un futur proche ou lointain des paramètres extérieurs ayant une influence sur le climat global. Ces scénarios socio-économiques sont par la suite implémentés dans des modèles afin d'évaluer leur influence sur le climat puis sur les conditions météorologiques (Chapitre 3.5.1.3).

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) a défini six familles de scénarios d'émissions (Special Report on Emissions Scenarios – SRES), qui sont largement acceptées et adaptées dans la communauté scientifique. Ces scénarios, définis pour la période 2001 à 2100 sont basés sur différentes hypothèses ayant trait à l'évolution démographique, sociale, économique et technologique, et peuvent être divisés en quatre familles [59] :

- Scénario A1 – un monde intégré : Croissance économique rapide ; croissance de la population mondiale jusqu'en 2050 (9 milliards), puis déclin ; introduction rapide de nouvelles technologies efficaces ; diminution des disparités et interactions sociales et culturelles entre les différentes régions (globalisation) ; subdivision en 3 sous-familles :
  - A1F1 : Recours intense aux énergies fossiles.
  - A1B : Balance entre énergies fossiles et non-fossiles.
  - A1T : Recours aux énergies non-fossiles.
- Scénario A2 – un monde hétérogène : Décisions politiques avant tout au niveau national ; orientation avant tout régionale de la croissance économique ; croissance continue de la population mondiale ; évolution technologique plus fragmentée et plus lente.
- Scénario B1 – un monde intégré et écologique : Croissance économique rapide avec un changement rapide vers une économie de services et d'information ; croissance de la population mondiale jusqu'en 2050 (9 milliards), puis déclin ; diminution sensible de l'intensité matérielle de l'économie et introduction de technologies propres et ménageant les ressources ; accent porté sur des solutions globales vis-à-vis de la stabilité économique, sociale et environnementale.
- Scénario B2 – un monde hétérogène mais écologique : Développement intermédiaire de la croissance économique ; croissance continue de la population mondiale, mais moins prononcée que pour le scénario A2 ; évolution technologique plus fragmentée et plus lente que dans les scénarios A1 et B1 ; accent porté sur des solutions locales vis-à-vis de la stabilité économique, sociale et environnementale.

Les scénarios SRES indiquent dans un premier temps le changement attendu des émissions des gaz à effet de serre (GES) pour chaque scénario, puis ses émissions sont transformées en concentrations des GES dans l'atmosphère (Fig. 3.19). Celles-ci peuvent ensuite être employées dans les modèles pour simuler l'impact sur les conditions météorologiques moyennes et extrêmes [59].



**Fig. 3.19** – Changement attendu des émissions et concentrations des principaux gaz à effet de serre pour les quatre familles de scénarios SRES [59].

Les scénarios ne considèrent en règle générale pas de changements abrupts du climat global. Un tel changement peut intervenir si un système climatique régional ou mondial passe un certain seuil de non-retour (tipping point – point de basculement), ce qui provoquerait une transition vers un système complètement différent (p.ex. changement du Gulf Stream). Si un tel changement devait intervenir, toute modélisation basée sur les modèles actuels deviendrait inutile et il conviendrait de développer de nouveaux modèles [53][59].

Les scénarios ne considèrent pas non plus des considérations relatives à la problématique des GES piégés dans certains sols actuellement gelés (permafrost) ou dans des sédiments subaquatiques. En effet, certaines études préconisent qu'un réchauffement des sols et de la température des océans pourrait considérablement augmenter les GES émis dans l'atmosphère d'ici 2100 (surtout du méthane) [81].

### 3.5.1.2. Modèles statistiques

Les modèles statistiques sont basés sur des scénarios d'évolution des conditions météorologiques (température, précipitations, etc.) reportées dans un futur. Il s'agit donc dans ce cas d'évaluer des tendances statistiques et probabilistes et de les reporter dans un futur proche ou lointain. Il est également possible d'intégrer des hypothèses sur des changements des paramètres extérieurs (concentration de CO<sub>2</sub>, considérations économiques, etc.), traduits par des changements directs des conditions météorologiques.

Comme mentionné auparavant (Chapitre 3.2), la plupart du temps le changement climatique implique non seulement un changement de la moyenne mais également de la variabilité d'une distribution statistique par rapport à un paramètre météorologique donné. Ceci a comme effet un changement plus prononcé des conditions extrêmes par rapport aux conditions moyennes.



Les conditions météorologiques moyennes peuvent être facilement modélisées à l'aide de modèles statistiques. En effet, des tendances assez nettes peuvent pour la plupart du temps être détectées pour les différents paramètres météorologiques [70].

Les tendances des conditions météorologiques extrêmes sont plus difficiles à mettre en évidence du fait de leur rareté. En effet, plus ces événements sont rares, plus il est difficile d'apercevoir une tendance nette. Souvent, pour prévoir le changement des conditions extrêmes, on passe par une prévision des conditions moyennes, puis on tente de trouver un lien entre les deux types de conditions [70].

Il convient de faire attention à la période de référence choisie pour les modèles statistiques, car une période de référence mal définie peut fausser considérablement les prévisions des conditions (période trop courte ou trop longue, période avec plusieurs événements extrêmes en début ou en fin, période avec un changement radical au milieu, etc.). La période de référence standard de 1961 à 1990 a souvent été utilisée dans la littérature pour les modèles statistiques, mais d'autres périodes fixes ou variables peuvent également être choisies. Ces dernières années, l'on a souvent eu recours à des périodes de référence constamment mises à jour (année  $x$  moins 30 ans) [70][84].

### 3.5.1.3. Modèles climatiques

Les modèles climatiques permettent de modéliser le climat futur en employant comme données d'entrée les paramètres des scénarios associés. Les modèles existants peuvent être divisés en modèles généraux de circulation (General circulation models – GCM), décrivant le climat global, et les modèles climatiques régionaux (Regional Climate Model – RCM), décrivant le climat au niveau régional.

Les GCM simulent le climat global avec une résolution assez grossière, en incluant des processus déterminants se déroulant dans l'atmosphère, les océans, la banquise et sur la terre ferme. Souvent différents GCM, où chaque modèle décrit un processus spécifique, sont employés ensemble. Les GCM sont basés sur des représentations des courants atmosphériques et océaniques servant à calculer leur évolution future. Grâce aux GCM il est possible de modéliser des paramètres moyens du climat, tels que la température globale moyenne, par rapport à divers scénarios [70][80].

Néanmoins, pour évaluer les effets du changement climatique global au niveau régional et local, des modèles régionaux (RCM) ou des modèles généraux (GCM) à très haute résolution sont nécessaires. Les RCM permettent de simuler des conditions météorologiques moyennes (température moyenne, précipitations moyennes, etc.), mais également des conditions extrêmes, à des échelons beaucoup plus petits. La plupart du temps, des chaînes de modèles sont utilisées, afin d'atteindre la résolution souhaitée (procédé "downscaling"). Dans ce cas, le modèle avec la plus grande résolution est basé sur les données issues du modèle avec la 2<sup>ème</sup> plus grande résolution, et ainsi de suite jusqu'à la résolution souhaitée (Fig. 3.20) [45][70].

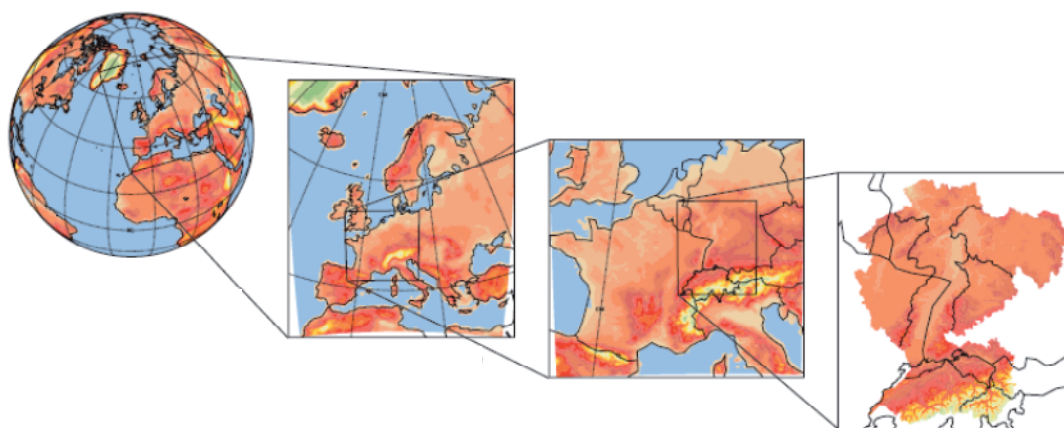


Fig. 3.20 – Exemple d'une chaîne de plusieurs modèles climatiques [70].



Pour la modélisation régionale, on peut aussi recourir à des méthodes de régionalisation statistiques. Celles-ci sont basées sur des considérations quantitatives du rapport entre les grandeurs climatiques régionales et les propriétés à plus grande échelle de l'atmosphère (p.ex. interaction entre les précipitations dans une vallée suisse et les pressions atmosphériques à plus grande échelle). Les considérations quantitatives sont établies de manière empirique à partir d'observations du climat dans le passé. Ces méthodes statistiques requièrent un volume de calcul beaucoup plus faible et permettent une bien meilleure prévision des conditions météorologiques extrêmes et des conditions très localisées (précipitations, tempêtes, etc.). On parle de couplage de méthode, lorsque des méthodes de régionalisation statistiques sont utilisées sur la base de modèles GCM [33][45][70].

Il existe de nombreux modèles GCM et RCM de part le monde. Chaque modèle est basé sur des hypothèses spécifiques et, de ce fait, des résultats pas toujours identiques d'un modèle à un autre. Il convient de bien choisir les modèles à utiliser, selon le type de recherche à effectuer.

Les résultats des modélisations globales et régionales peuvent présenter plusieurs incertitudes :

- Concernant les GCM, des incertitudes dues aux hypothèses de base persistent, la dispersion entre les résultats des précipitations globales moyennes est actuellement encore considérable, etc. [58][70].
- Concernant les RCM, des incertitudes dues aux hypothèses de base persistent (surtout conditions de limites), la modélisation d'événements extrêmes (inondations, sécheresses, etc.) présente encore beaucoup d'incertitudes, etc. [58][70].
- Les incertitudes augmentent avec chaque modèle supplémentaire lorsqu'une chaîne de modèles est utilisée. La qualité d'une chaîne dépend de chaque maillon de la chaîne [70].

En outre, des incertitudes considérables existent par rapport aux scénarios climatiques décrits ci-dessus (Chapitre 3.5.1.1) [45][58].

### **3.5.2. Prévisions des conditions météorologiques globales**

La prévision du climat et des conditions météorologiques globales fait appel aux scénarios et modèles décrits ci-dessus (Chapitre 3.5.1). La modélisation à ce niveau s'intéresse principalement aux changements des conditions météorologiques moyennes (Chapitre 3.5.2.1), car les conditions extrêmes sont plus spécifiques par rapport à des paramètres régionaux, voir locaux. Néanmoins, certaines considérations par rapport aux changements des événements extrêmes peuvent être formulées (Chapitre 3.5.2.2).

#### *3.5.2.1. Conditions météorologiques moyennes*

La modélisation des conditions météorologiques moyennes selon les scénarios SRES de l'IPCC montre une augmentation de la température globale moyenne entre +1.1 et +6.4°C pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999 (Fig. 3.21, Fig. 3.22). Par rapport à l'ère préindustrielle, ces modélisations indiquent un réchauffement pouvant atteindre plus que +7°C. Même si les émissions de GES devraient rester constantes, la tendance de réchauffement devrait continuer pendant les prochaines décennies à cause de la réponse plus lente du système climatique global. Avec un réchauffement suivant les tendances des décennies passées, un climat tel qu'il s'est présenté pendant l'ère de crétacé pourrait se présenter à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle [59][72].

Pour toutes les régions continentales et pour chaque scénario d'émission SRES, le réchauffement prévu pour la période 2000-2050 est plus grand que la moyenne globale et plus grand que le réchauffement observé pendant le 20<sup>ème</sup> siècle (Fig. 3.21, Fig. 3.22) [59].

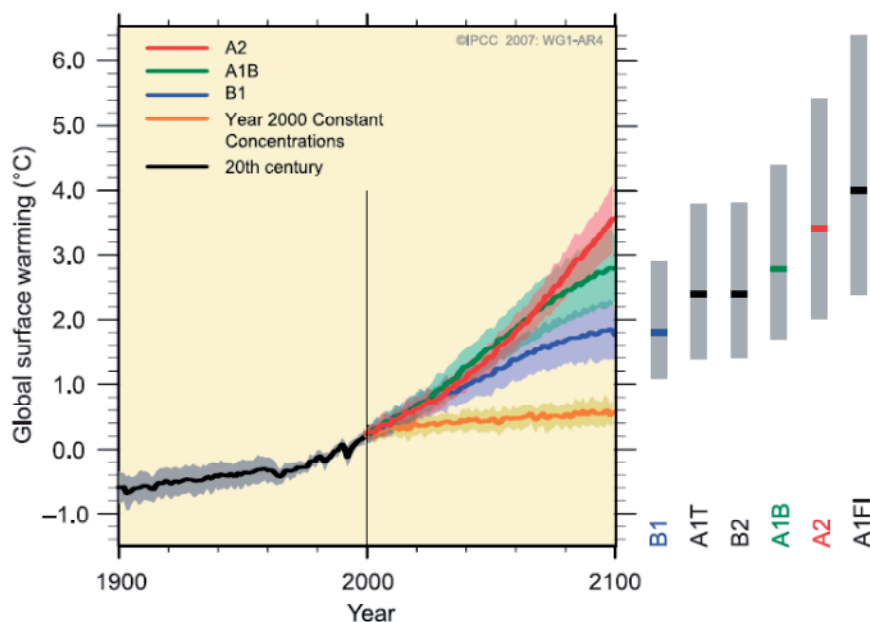


Fig. 3.21 – Prévion du réchauffement globale pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 et selon différents scénarios climatiques [59].

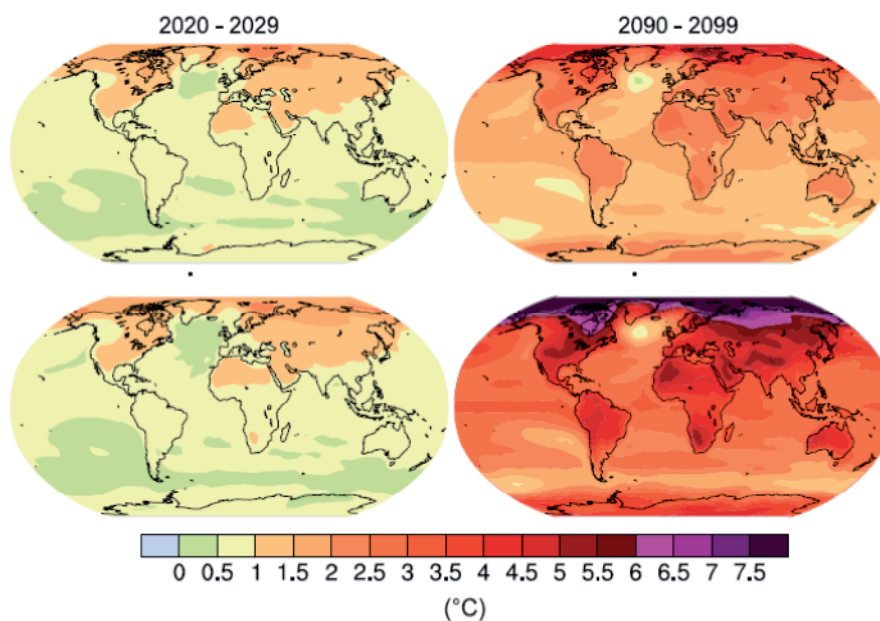
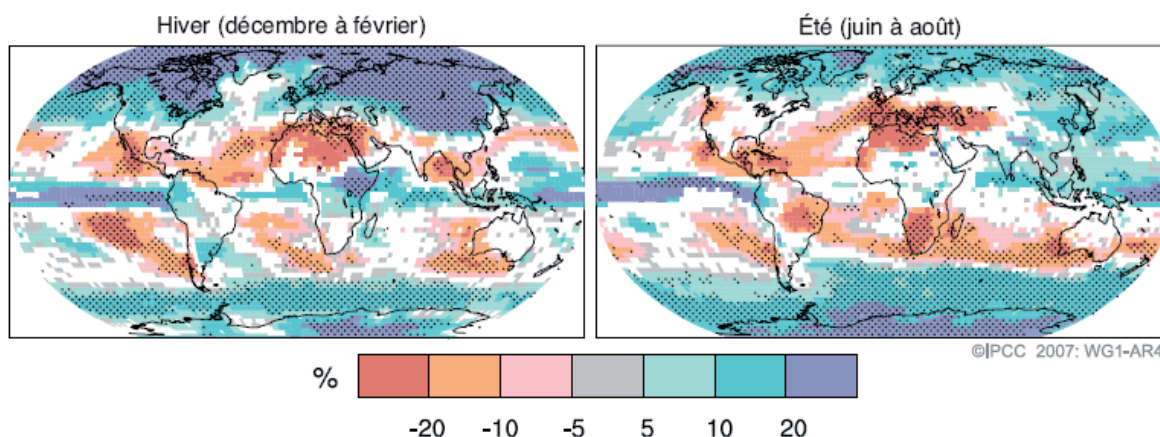


Fig. 3.22 – Prévion du réchauffement globale pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 (en haut : scénario à faibles émissions B1 ; en bas : scénario à fortes émissions A2) [59].

Au niveau du réchauffement en Europe central, une augmentation des températures est attendue pour les quatre saisons, mais avec un réchauffement plus marqué en été [59].

Concernant les précipitations moyennes, un accroissement des précipitations aux hautes latitudes est considéré comme très probable, dans les régions subtropicales par contre, une diminution est probable (Fig. 3.23) [59][72].



**Fig. 3.23** – Prédiction des changements globaux des précipitations pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 [59].

Au niveau des précipitations en Europe central, une augmentation des précipitations moyennes en hiver (entre 5 et 20%), mais une diminution en été (entre -5 et -20%) et peu de changements au printemps et en automne, sont attendus. En même temps, la durée ainsi que les volumes d'enneigement devraient diminuer dans la plupart des régions européennes [58][59].

Au niveau des vents en Europe central, les modèles indiquent de manière générale une augmentation des vitesses moyennes en hiver et une faible diminution au printemps et en automne, mais aucun changement significatif en été [59].

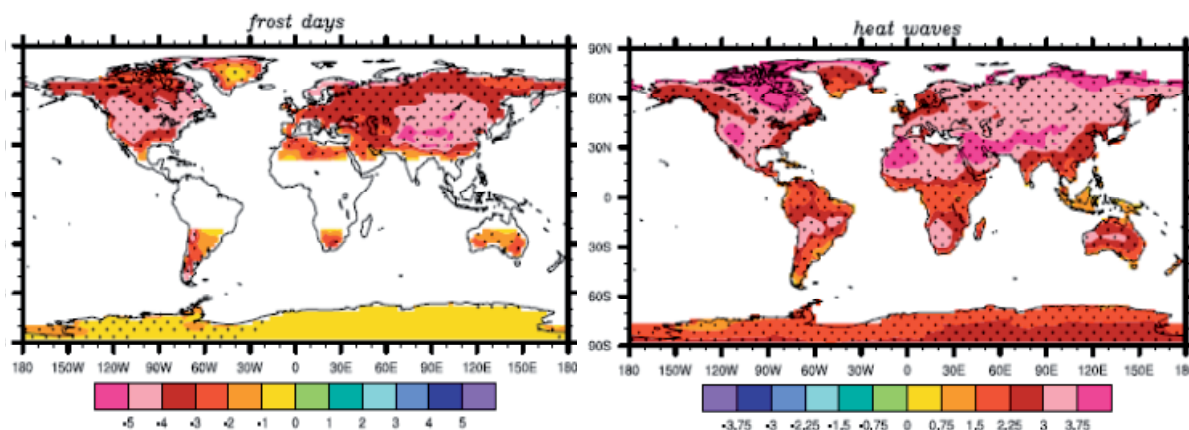
Concernant les changements du rayonnement solaire, les modèles ne donnent pas de tendance nette pour le prochain siècle [59].

### 3.5.2.2. Conditions météorologiques extrêmes

La modélisation des conditions météorologiques extrêmes au niveau global est très délicate du fait de la grande dépendance de ces événements par rapport aux paramètres régionaux et locaux. Néanmoins, certaines considérations par rapport aux changements des conditions extrêmes peuvent être formulées.

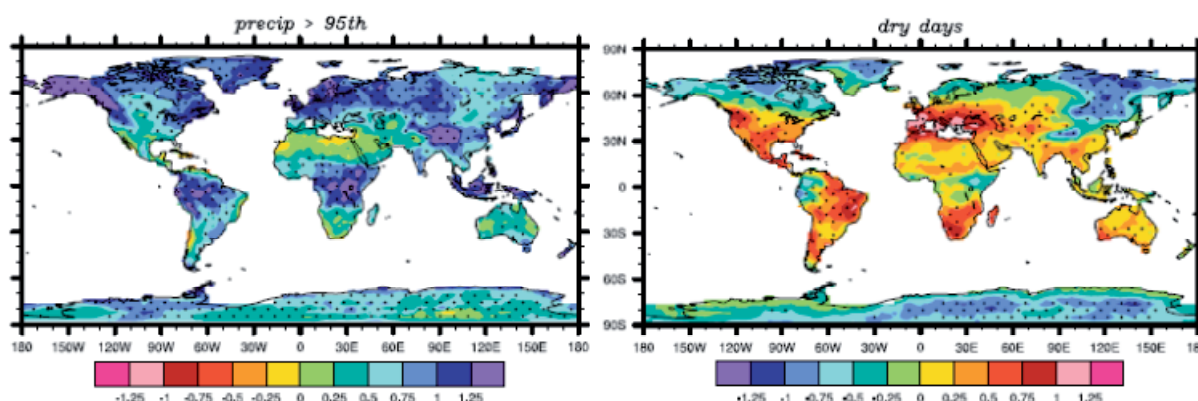
Les modélisations des scénarios SRES de l'IPCC montrent une augmentation des températures journalières maximales et minimales partout dans le monde. En Europe central les températures maximales et minimales devraient augmenter d'avantage que les températures moyennes, surtout au niveau des températures minimales on devrait assister à un réchauffement plus marqué dû à la diminution des périodes d'enneigement. En même temps, une augmentation globale du nombre de périodes très chaudes (canicules) et une diminution du nombre de périodes très froides est très probable (Fig. 3.24) [59][64][70][85].

Les températures nocturnes devraient augmenter plus rapidement que les températures journalières dans le monde, avec à la clé une diminution de la variation journalière DTR (diurnal temperature range). Pour l'Europe central, la variabilité des températures journalières devrait augmenter en été, mais plutôt diminuer en hiver [59][66][70].



**Fig. 3.24** – Prédiction des changements globaux des journées avec gel (gauche) et des canicules (droite) pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 pour le scénario A1B [85].

Les précipitations extrêmes devraient augmenter en nombre et en intensité dans la plupart des parties de la planète, à cause de l’augmentation de la température globale. En ce qui concerne l’Europe central il faut s’attendre à une apparition plus soutenue de sécheresses en été (plus nombreuses, plus longues et plus intenses) due à la diminution des précipitations et l’augmentation des températures extrêmes. En même temps, des événements de précipitations extrêmes plus nombreux en hiver sont attendus pour cette région. Par contre d’autres régions du globe risquent de présenter des phénomènes inverses (Fig. 3.25) [45][64][85].



**Fig. 3.25** – Prédiction des changements globaux des fortes précipitations (gauche) et des sécheresses (droite) pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 pour le scénario A1B [85].

Les différentes modélisations du changement des fréquences et intensités des vents extrêmes au niveau global ne livrent actuellement pas de réponses claires. Néanmoins, une augmentation des vents extrêmes en Europe centrale, à l’exception des régions du sud des Alpes et des Alpes elles-mêmes, semble très probable. La prévision par rapport aux tempêtes et cyclones tropicaux est plus délicate, mais une tendance vers une augmentation de tels événements est possible [45][52].

### 3.5.3. Prévisions des conditions météorologiques en Suisse

La prévision des conditions météorologiques au niveau de la Suisse fait appel aux scénarios et modèles décrits ci-dessus (Chapitre 3.5.1). La modélisation à ce niveau s'intéresse aussi bien aux changements des conditions météorologiques moyennes (Chapitre 3.5.3.1) qu'aux conditions extrêmes (Chapitre 3.5.3.2). Les modèles employés ici sont principalement de type modèle régional (RCM).

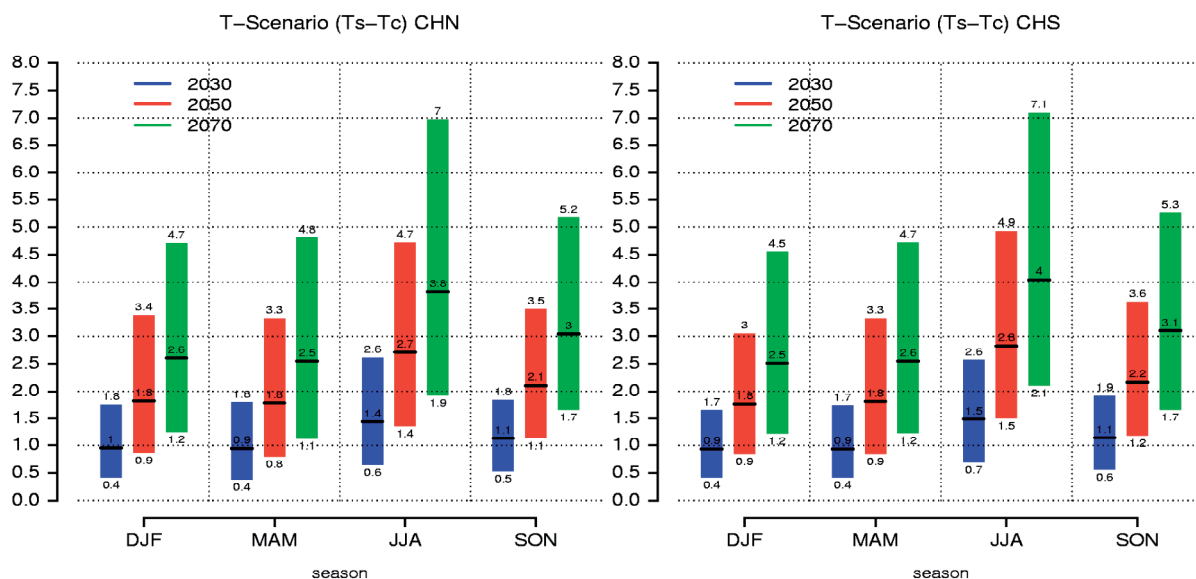
Le tableau ci-après donne un aperçu des prévisions des conditions météorologiques moyennes et extrêmes pour le cas spécifique de la Suisse (Tab. 3.1) [54][55][59][70][71][72][86].

|                            |          | Paramètre   | Changement  | Probabilité   |
|----------------------------|----------|---|---|---------------|
| Conditions météorologiques | Moyennes | Températures moyennes                             | Augmentation des températures moyennes                                  | Très probable |
|                            |          | Précipitations moyennes (hiver)                   | Augmentation en hiver   | Très probable |
|                            |          | Précipitations moyennes (été, printemps, automne) | Diminution marquée en été, faible diminution au printemps et en automne | Très probable |
|                            |          | Limite de neige                                   | Elévation de la limite de neige   | Très probable |
|                            |          | Manteau neigeux (faible et moyenne altitude)      | Diminution de l'étendue et de l'épaisseur                               | Très probable |
|                            |          | Manteau neigeux (haute altitude)                  | Augmentation de l'épaisseur mais diminution de l'étendue                | Possible      |
|                            |          | Permafrost  | Diminution des zones de permafrost                                      | Très probable |
|                            |          | Rayonnement solaire                               | Pas de tendance   | Probable      |
|                            | Extrêmes | Températures maximales                            | Augmentation des températures maximales                                 | Très probable |
|                            |          | Températures minimales                            | Augmentation des températures minimales                                 | Très probable |
|                            |          | Cycles gel-dégel                                  | Augmentation du nombre  | Possible      |
|                            |          | Canicules   | Augmentation du nombre et de l'intensité                                | Très probable |
|                            |          | Périodes froides                                  | Diminution du nombre et de l'intensité                                  | Très probable |
|                            |          | Précipitations extrêmes (hiver)                   | Augmentation du nombre et de l'intensité                                | Très probable |
|                            |          | Précipitations extrêmes (été)                     | Augmentation du nombre et de l'intensité                                | Probable      |
|                            |          | Sécheresses                                       | Augmentation du nombre, de la durée et de l'intensité                   | Très probable |
|                            |          | Tempêtes  | Diminution du nombre  | Probable      |
|                            |          | Tempêtes (extrêmes)                               | Augmentation du nombre  | Probable      |

Tab. 3.1 – Aperçu des prévisions des conditions météorologiques moyennes et extrêmes pour la Suisse.

#### 3.5.3.1. Conditions météorologiques moyennes

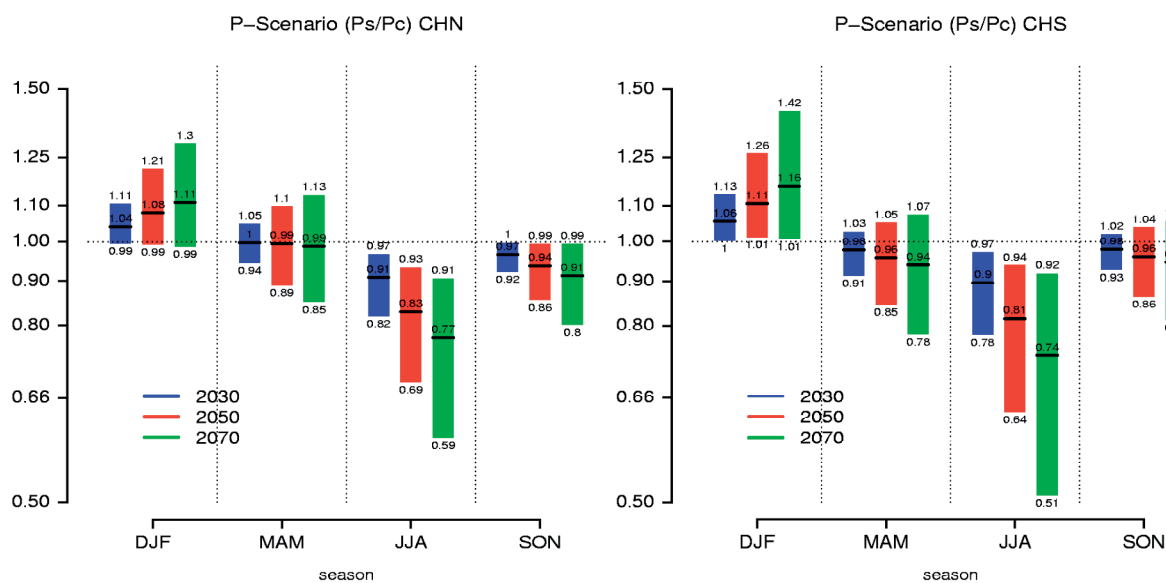
La modélisation des conditions météorologiques moyennes pour la Suisse montre une grande dépendance des changements des paramètres par rapport aux saisons. Une augmentation des températures moyennes est attendue pour les quatre saisons, mais une augmentation plus marquée pour l'été est très probable. Les entre-saisons (printemps, automne) devraient présenter des réchauffements similaires à celui de la saison hivernale. La différence entre les températures attendues au nord et au sud des Alpes reste très faible (Fig. 3.26) [55][72].



**Fig. 3.26** – Prévision du réchauffement en Suisse pour le 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à l’année de référence 1990 (à gauche : Nord des Alpes ; à droite : Sud des Alpes) [55].

L’augmentation des températures moyennes hivernales aura comme conséquence une élévation de la limite de neige (limite 1990 à environ 900 m d’altitude ; élévation de la limite entre 180 m à 680 m d’ici 2050 selon le réchauffement) [71].

Concernant les précipitations moyennes, une augmentation des précipitations moyennes en hiver et une diminution en été est très probable. Les entre-saisons (printemps, automne) devront plutôt présenter de faibles diminutions des précipitations moyennes. La différence entre les moyennes des précipitations attendues au nord et au sud des Alpes reste très faible, mais au sud on assiste à une plus grande variabilité des résultats (Fig. 3.27) [55][72].



**Fig. 3.27** – Prévision des changements des précipitations en Suisse pour le 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à l’année de référence 1990 (à gauche : Nord des Alpes ; à droite : Sud des Alpes) [55].

L’étendue du manteau neigeux et son épaisseur devrait diminuer à faible et moyenne altitude à cause de l’augmentation de la température. La limite de neige aura tendance à s’élever de plus en plus. A haute altitude (>2000 m), on pourrait assister à une légère augmentation de l’épaisseur du manteau due à des précipitations plus importantes en hiver, mais à une diminution de son étendue



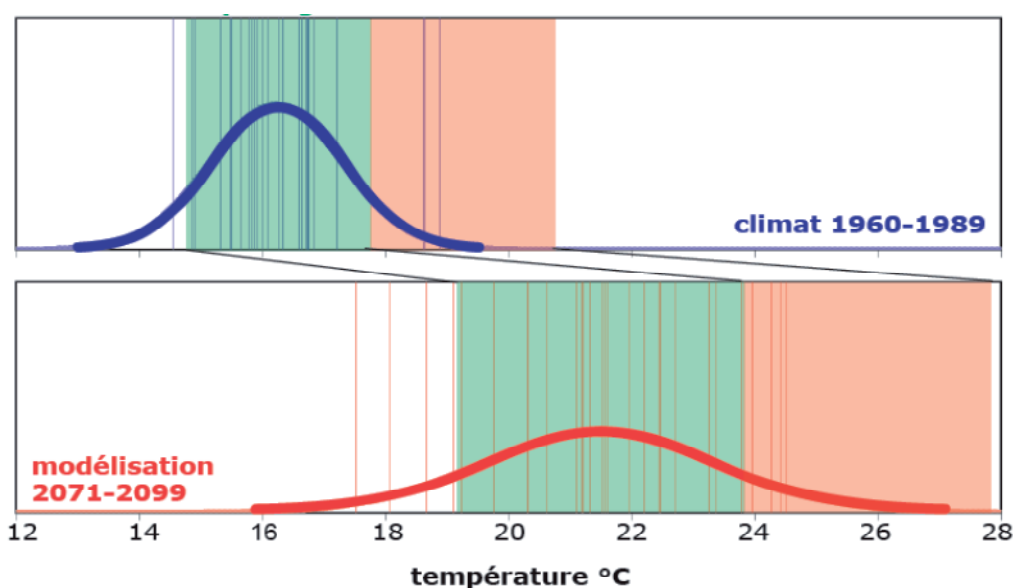
due à l'augmentation des températures. Néanmoins, si l'augmentation de la température de l'air devrait être trop importante, alors même à haute altitude, l'étendue et l'épaisseur du manteau neigeux devraient diminuer [54].

De manière générale, les zones de permafrost en Suisse (environ 5% de la surface totale, c.-à-d. environ 2100 km<sup>2</sup>) devraient diminuer avec le changement climatique, ce qui aura des conséquences néfastes sur la portance des sols en haute altitude [54].

Concernant les changements du rayonnement solaire, les modèles ne donnent pas de tendance nette pour le prochain siècle [59][71].

### 3.5.3.2. Conditions météorologiques extrêmes

Les modélisations montrent une augmentation des températures journalières maximales et minimales en Suisse. Les températures maximales absolues devraient augmenter d'avantage que les températures maximales journalières moyennes (Fig. 3.28) [71].



**Fig. 3.28** – Prédiction du réchauffement en Suisse pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle avec modification de la probabilité et de l'intensité des événements extrêmes par rapport à la période de référence 1960-1989 [71].

La hausse des températures moyennes a pour conséquence une augmentation des périodes de forte chaleur. En effet, avec un réchauffement d'environ 4.5°C, un été sur deux atteindrait ou dépasserait l'intensité de l'été caniculaire 2003. L'augmentation de la variabilité journalière des températures estivales est également très probable, ce qui accentuerait l'apparition de périodes très chaudes [71][72].

En contrepartie, la fréquence de périodes très froides et les périodes de gel devraient diminuer. En même temps, la variabilité journalière des températures devrait également être plus faible car les températures minimales subiraient une hausse plus forte que les températures moyennes. En altitude, ceci est surtout dû à la diminution attendue des conditions d'enneigement [70][71].

Certaines recherches indiquent que le changement climatique ne se manifestera pas seulement par l'apparition plus fréquente de périodes chaudes, mais également par la manifestation de périodes occasionnelles de froid extrême en hiver, due à un changement des vents dominants. Ces situations se présentent lorsque les vents froids du nord atteignent la Suisse et ce phénomène a eu lieu à plusieurs reprises ces dernières années (dont 2009 et surtout à la fin de l'année 2010) [86].

Les précipitations extrêmes devraient augmenter en nombre et en intensité en Suisse pour la saison hivernale. Des précipitations intenses actuelles avec des temps de retour entre 8 et 20 ans devraient se produire en moyenne tous les 5 ans d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Pour l'été la plupart des modèles indiquent une augmentation des événements extrêmes [71].

Il est également attendu que les périodes de sécheresses seront plus longues, plus fréquentes et plus intenses en été, conformément à la diminution des précipitations moyennes et l'augmentation des températures extrêmes [71].

En ce qui concerne l'évolution des tempêtes, une diminution de leur fréquence est attendue, par contre les événements extrêmes (p.ex. tempêtes, telles que Vivian en 1990 et Lothar en 1999) devraient se produire plus fréquemment [71].

### 3.5.4. Impacts du changement climatique

Les prévisions des conditions météorologiques moyennes et extrêmes indiquent que le climat pourrait subir des changements importants d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Ces changements auront des impacts considérables sur la société, les être humains, l'environnement, etc. et risquent de toucher en premier lieu les régions les plus pauvres de la planète.

Un réchauffement de plus de 2.5°C par rapport à l'ère préindustrielle menacerait par exemple la disparition d'un tiers des espèces animales et végétales. Une élévation de 6.5°C de la température globale correspond environ à la différence entre les phases les plus froides de la dernière glaciation et aujourd'hui [72].

L'impact de ce changement touchera tous les domaines comme décrits ci-dessus (Chapitres 3.3.4 et 3.4.7), mais avec une intensité beaucoup plus marquée. La montée du niveau de la mer pourrait par exemple atteindre +0.6 m par rapport à la période 1980-1999 pour le pire des cas (Fig. 3.29) [59]. De même des changements radicaux pourraient se produire, comme par exemple le renversement des circulations marines.

| Case   | Sea Level Rise<br>(m at 2090-2099 relative to 1980-1999)<br>Model-based range excluding future<br>rapid dynamical changes in ice flow |
|--|---|
| Constant Year 2000 concentrations <sup>b</sup> | NA  |
| B1 scenario                                    | 0.18 – 0.38   |
| A1T scenario                                   | 0.20 – 0.45   |
| B2 scenario                                    | 0.20 – 0.43   |
| A1B scenario                                   | 0.21 – 0.48   |
| A2 scenario                                    | 0.23 – 0.51   |
| A1FI scenario                                  | 0.26 – 0.59   |

**Fig. 3.29** – Prédiction de la montée du niveau de la mer pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence 1980-1999 [59].

L'Union Européenne, les Nations Unies et plusieurs pays ont adopté des directives pour limiter le changement climatique. Lors des protocoles de Kyoto (1995), de Copenhague (2009) et surtout de Cancun (2010), l'objectif de conserver la hausse de la température globale moyenne en-dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle (ou 1.5°C depuis 1990), afin de limiter les risques de changements dangereux et imprévisibles du climat, a été adopté par la plupart des pays. Néanmoins, cette limite de 2°C sera franchie au cours du 21<sup>ème</sup> siècle selon tous les scénarios SRES de l'IPCC [49].



## 4. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LE DOMAINE DU TRANSPORT ROUTIER

Le domaine du transport routier joue un double rôle dans la problématique du changement climatique. D'une part, les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre produites par les véhicules contribuent au phénomène de changement climatique et d'autre part, le domaine est en retour touché par les impacts de ce changement.

Dans ce chapitre, les liens entre le changement climatique et le domaine du transport routier sont discutés. Tout d'abord, les projets de recherches et initiatives terminés ou en cours, nationaux ou internationaux, sont abordés (Chapitre 4.1), puis les impacts du changement climatique sur les infrastructures routières et le trafic et les usagers de la route sont décrits (Chapitre 4.2).

### 4.1. Recherches et initiatives terminées ou en cours

En Suisse, l'interaction entre le changement climatique et le domaine du transport routier n'a fait l'objet d'aucun projet de recherche. Par contre, plusieurs projets de recherche européens sur l'impact du changement climatique dans le domaine du transport routier ont été menés ou sont en cours d'investigation. Ci-après sont décrites certaines recherches et initiatives européennes :

- COST Action TU0702 – Real-time Monitoring, Surveillance and Control of Road Networks under Adverse Weather Conditions. Programme de coordination de projets européen sur la thématique de l'impact des conditions météorologiques extrêmes sur le trafic et les infrastructures routières (2008-2012).
- Forever Open Road : Programme de recherche du FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) (2009-2013) ayant comme objectif la mise au point d'une vision sur la construction et la maintenance des routes au 21<sup>ème</sup> siècle. L'impact du changement climatique sur les infrastructures routières est un des points principaux du programme [29].
- IRWIN (Improved local Road Winter index to assess maintenance needs and adaptation costs in climate change scenarios) : Projet de recherche financé par la Commission Européenne (2008-2010 – 6<sup>ème</sup> Framework Programme) sur le développement d'index hivernaux de maintenance des routes. Ces index sont basés sur des scénarios climatiques obtenus en combinant les résultats provenant d'un modèle général de circulation (GCM) avec les données provenant des systèmes globaux de prise en compte des facteurs météorologiques et routiers (Road Weather Information System – RWIS) [14].
- P2R2C2 (Pavement Performance and Remediation Requirements following Climate Change) : Projet de recherche financé par la Commission Européenne (2008-2010 – 6<sup>ème</sup> Framework Programme) sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les performances des revêtements [15].
- RIMAROCC (Risk Management for Roads in a Changing Climate) : Projet de recherche financé par la Commission Européenne (2008-2010 – 6<sup>ème</sup> Framework Programme) sur le développement d'une méthode commune d'analyse et de management de risque pour les routes par rapport au changement climatique [16][24].

- SWAMP (Storm Water Prevention – Methods to predict damage from the water stream in and near road pavements in lowland areas) : Projet de recherche financé par la Commission Européenne (2008-2010 – 6<sup>ème</sup> Framework Programme) sur le développement d'une méthodologie pour détecter des sites susceptibles d'être inondés lors d'événements de fortes précipitations et sur la proposition de lignes directrices pour réduire la vulnérabilité de ces sites [17].

Le réseau ERA-NET ROAD, initié en 2005 au sein du FEHRL, a permis de définir plusieurs de ces projets de recherche (IRWIN, P2R2C2, RIMAROCC, SWAMP). L'objectif de ce réseau consiste à déterminer des domaines de recherche intéressants pour tous les participants.

La plupart des pays industrialisés ont lancé des projets de recherche ou initiatives nationaux sur l'impact du changement climatique dans le domaine du transport routier. Certains projets ont déjà été menés alors que d'autres sont en cours d'investigation. Voici un aperçu de certains projets de grande envergure :

- Allemagne : Il existe plusieurs projets de recherche dans le domaine de l'impact du changement climatique sur les routes, les ponts et les talus, parmi lesquelles on peut mentionner :
  - Projet "Bereitstellung der Straßen- und Bauwerksdaten für die Analyse der Auswirkung des Klimawandels" (fin : 2010) sur l'impact du changement climatique sur les infrastructures de transport avec mise au point d'une application online [21].
  - Projet "Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen" (en cours) sur l'impact du changement climatique sur les glissements de talus proches des infrastructures de transport [23].
  - Projet "Ermittlung des Aquaplaningrisikos auf Bundesfernstraßen unter Berücksichtigung des Klimawandels und den damit verbundenen Niederschlagsereignissen" (en cours) sur l'impact du changement climatique sur le risque d'aquaplaning.
- Angleterre : Programme de recherche "The changing climate: its impact on the Department for Transport" de la "Department for Transport" (2003-2008) sur l'impact du changement climatique dans le domaine de transport [7].
- Australie : Programme de recherche "Impact of Climate Change on Road Infrastructure" (fin : 2004) de la "Austroads" sur l'impact du changement climatique dans le domaine des infrastructures routières en se basant sur les modèles climatiques issus du rapport 2007 de l'IPCC [59]. Tous les possibles changements de conditions météorologiques (moyennes et extrêmes) et leurs impacts sur les routes ont été évalués [4].
- Canada : Programme de recherche "From Impacts to Adaptation: Canada in a changing climate 2007" (fin : 2007) du Gouvernement du Canada sur l'impact du changement climatique, la modélisation de scénarios climatiques futurs et les mesures d'adaptation possibles [20].
- Danemark : Programme de recherche "Effects of Climate Change – Adaptations in Denmark" (2001-2003) de la "Danish Academy for the Technical Sciences (ATV)" sur l'impact du changement climatique dans le domaine de transport et sur les possibles mesures d'adaptation [6].
- Etats-Unis : Programme de recherche "Potential impacts of climate change on U.S. transportation" (fin : 2008) du "Transportation Research Board (TRB)" sur l'impact du changement climatique dans le domaine de transport et sur les possibles mesures d'adaptation [33].
- France : Programme de recherche instauré par le Réseau Génie Civil et Urbain sur les infrastructures de transport (2004-2007). Un consortium, composé de concessionnaires

autoroutiers (SANEF, ASF), de partenaires publics (Météo France et LCPC), de partenaires privés (ESRI France et BCEOM) et piloté par SCETAUROUTE, a été mis en place. Le projet avait comme objectif l'élaboration d'un outil d'analyse de risque (GeRiCi – Outil de Gestion des Risques liés aux Changements Climatiques pour les Infrastructures) [30].

- Norvège : Programme de recherche "Climate and Transport" (2007-2011) de la "Norwegian Public Roads Administration" sur l'adaptation des routes en Norvège par rapport au changement climatique. Les différentes étapes de la vie d'une route sont analysées : conception, dimensionnement, opération, maintenance, etc. [28].
- Nouvelle-Zélande : Programme de recherche "Climate Change Uncertainty and the State Highway Network" (fin : 2005) de l'agence gouvernementale responsable du réseau autoroutier "Transit" sur l'impact du changement climatique sur le réseau autoroutier en Nouvelle-Zélande. Différentes mesures d'adaptation sont présentées et des calculs coûts-bénéfices effectués par rapport aux mesures proposées [22].
- Suède : Programme de recherche "Sweden facing climate change" (2005-2007) de la "Swedish Commission on Climate and Vulnerability" sur les risques et la vulnérabilité liés au changement climatique avec chapitre dédié au domaine de transport [32].

La plupart de ces recherches évaluant uniquement l'impact global du changement climatique sur le domaine du transport routier. Elles décrivent les possibles impacts, les conditions météorologiques à risque, les éléments vulnérables, etc. En ce qui concerne l'impact du changement climatique sur les infrastructures routières et plus spécifiquement sur les performances des revêtements, les recherches sont encore très peu nombreuses. Même si plusieurs recherches traitent plus spécifiquement ce domaine, celles-ci se limitent la plupart du temps à l'évaluation globale de l'impact du changement climatique sans proposition de mesures d'adaptation ni d'analyses plus spécifiques (analyse de risque, analyses météorologiques spécifiques, etc.).

Certaines recherches, telles que le projet européen P2R2C2, s'intéressent plus spécifiquement à l'impact du changement climatique sur les performances des infrastructures routières. Les hypothèses prises dans ces recherches par rapport aux conditions météorologiques sont par contre très vagues.

## **4.2. Impacts dus au changement climatique**

Le changement climatique a un impact important sur le domaine du transport routier. D'une part il modifie les performances des infrastructures routières et d'autre part il a un impact direct sur le comportement des usagers et des véhicules. Le changement climatique ne devrait pas créer de nouveaux phénomènes météorologiques, il devrait uniquement changer la relation intensité–fréquence et par conséquent le degré d'exposition des routes à ces phénomènes [27].

Dans ce chapitre sont décrits les impacts majeurs ayant une forte probabilité de se produire au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Des incertitudes dues aux modélisations des conditions météorologiques moyennes et extrêmes futures persistent et rendent la recherche dans ce domaine très délicat.

### **4.2.1. Impacts sur les infrastructures routières**

Les impacts du changement climatique sur les infrastructures routières peuvent être dus aussi bien aux changements attendus des conditions moyennes que des conditions extrêmes. Néanmoins, les conditions météorologiques extrêmes devraient avoir des impacts beaucoup plus néfastes. Le changement climatique va générer des impacts négatifs sur les infrastructures, mais des impacts positifs pourraient également se produire. Dans le tableau Tab. 4.1 une synthèse des impacts majeurs auxquels les infrastructures routières seront exposées avec une forte probabilité a été établie [2][15][16][24][33][34][71].

| Effet du changement climatique                                    | Changements des conditions environnementales  | Impacts potentiels sur les infrastructures routières   |
|---|---|--|
| Changement températures moyennes                                  | Augmentation températures de chaussées moyennes   | Périodes de pose des enrobés bitumineux plus longues   |
| Changement températures minimales extrêmes                        | Augmentation températures minimales   | Périodes de gel moins nombreuses, zones de permafrost moins grandes, élévation de la limite d'enneigement<br>Meilleure adhérence véhicule – route  |
| Changement températures maximales extrêmes                        | Augmentation températures maximales   | Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (orniérage, ressuage, vieillissement thermique des bitumes, adhérence, etc.)<br>Expansion thermique accentuée de certains matériaux (chaussées en béton, ponts, joints, etc.)  |
| Changement variation journalière des températures                 | Augmentation variabilité journalière des températures de chaussées  | Dégradations liées aux cycles gel-dégel accélérées (fissuration thermique, fatigue, caractéristiques de surface, etc.)   |
| Changements apparition de périodes de sécheresses et de canicules | Augmentation nombre et intensité de périodes de sécheresses et de canicules   | Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (orniérage, ressuage, vieillissement thermique des bitumes, etc.)<br>Expansion thermique accentuée de certains matériaux (chaussées en béton, ponts, joints, etc.)<br>Conditions de construction des infrastructures plus pénibles pour les travailleurs<br>Assèchement des sols et tassement différentiels des fondations |
| Changements apparition de périodes de froid prolongé              | Diminution nombre et intensité de périodes de froid prolongé  | Périodes de gel moins nombreuses, zones de permafrost moins grandes, diminution de la profondeur de gel, élévation de la limite d'enneigement<br>Meilleure adhérence véhicule – route  |
| Changement précipitations moyennes en hiver                       | Précipitations neigeuses plus nombreuses à haute altitude ;<br>Précipitations pluvieuses plus nombreuses à basse altitude | Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, sensibilité à l'eau, etc.)<br>Erosion accentuée des sols et fondations de routes<br>Risque accru d'avalanches et de glissements de terrains  |
| Changement précipitations moyennes en été                         | Précipitations pluvieuses moins nombreuses  | Assèchement des sols et tassement différentiels des fondations<br>Périodes de pose des enrobés bitumineux plus longues   |
| Changement événements de précipitations extrêmes                  | Augmentation nombre et intensité d'événements de précipitations extrêmes  | Dégâts aux infrastructures dus à des inondations et des érosions des sols et fondations<br>Risque accru d'avalanches et de glissements de terrains<br>Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, sensibilité à l'eau, fissuration, etc.)  |
| Changement événements de tempêtes extrêmes                        | Augmentation nombre et intensité de tempêtes extrêmes   | Dégâts aux infrastructures dus à des objets tombants, dégâts aux ponts, dégâts aux dispositifs extérieurs à la voie (panneaux, lumières, signaux, etc.)  |
| Changement niveau de la mer                                       | Augmentation niveau de la mer   | Inondations et dégâts aux infrastructures à faible altitude<br>Erosion accentuée des sols et fondations de routes  |

**Tab. 4.1** – Aperçu des impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures routières.

Les impacts du changement climatique sur les infrastructures routières se traduiront par des modifications de certains paramètres de dimensionnement des routes (profondeur de gel, températures moyennes, indice de radiation, etc.). Ces paramètres se basent actuellement sur des considérations historiques des conditions météorologiques. Le changement climatique avec son impact sur ces conditions rendra ces considérations dangereuses. La prise en compte du changement climatique dans le dimensionnement des routes futures s'impose donc.

Pour les infrastructures routières, c'est principalement le phénomène d'accroissement des conditions météorologiques extrêmes qui impliquera les impacts les plus néfastes. Comme mentionné (Chapitre 3.2), le changement des valeurs moyennes des conditions météorologiques va entraîner un changement plus fort des valeurs extrêmes. Le risque lié à ces événements extrêmes sera donc considérable.

La dégradation des routes se traduira par une nécessité accrue de procéder à des travaux de réparation ou d'entretien. Ces travaux seront plus nombreux et plus conséquents, impliquant des coûts plus élevés et une gêne accentuée du trafic lors de la réalisation des travaux.

L'impact du changement climatique sur l'état structurel et fonctionnel des chaussées est discuté en détail dans le Chapitre 6.

#### **4.2.2. Impacts sur le trafic et les usagers**

Les impacts du changement climatique sur le trafic et les usagers peuvent être dus aussi bien aux changements attendus des conditions moyennes que des conditions extrêmes. Néanmoins, les conditions météorologiques extrêmes devraient également avoir des impacts plus néfastes. En même temps, le changement climatique devrait générer des impacts négatifs et positifs. Dans le tableau ci-après est donné un aperçu des impacts majeurs auxquels le trafic et les usagers seront exposés avec une forte probabilité (Tab. 4.2) [2][24][33][71].

La plupart des impacts sur les usagers peuvent être traduits en termes de risque d'accident plus élevé. En effet, une diminution de sécurité ou du confort peut impliquer une augmentation du risque d'accidents sur une route.

Le changement climatique risque également d'avoir des impacts directs sur des problématiques plus vastes touchant les usagers, telles que des changements démographiques (mouvements de populations fuyant des régions à risque). Ces impacts ne seront pas discutés dans le cadre de cette thèse, mais risquent d'avoir une influence indirecte sur le trafic et les usagers.

| Effet du changement climatique                                    | Changements des conditions environnementales  | Impacts potentiels sur le trafic et les usagers   |
|---|---|---|
| Changement températures moyennes                                  | Augmentation températures de chaussées moyennes   | -   |
| Changement températures minimales extrêmes                        | Augmentation températures minimales   | Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule – route<br>Accroissement des limitations d’accessibilité aux routes sur glace   |
| Changement températures maximales extrêmes                        | Augmentation températures maximales   | Réduction du confort à cause d’une dégradation accentuée des routes<br>Réduction du confort dans les véhicules et les transports publics  |
| Changement variation journalière des températures                 | Augmentation variabilité journalière des températures de chaussées  | Réduction du confort à cause d’une dégradation accentuée des routes   |
| Changements apparition de périodes de sécheresses et de canicules | Augmentation nombre et intensité de périodes de sécheresses et de canicules   | Réduction du confort à cause d’une dégradation accentuée des routes<br>Réduction du confort dans les véhicules et les transports publics<br>Augmentation du risque de feux de forêt<br>Augmentation de l’apparition du smog estival   |
| Changements apparition de périodes de froid prolongé              | Diminution nombre et intensité de périodes de froid prolongé  | Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule – route   |
| Changement précipitations moyennes en hiver                       | Précipitations neigeuses plus nombreuses à haute altitude ;<br>Précipitations pluvieuses plus nombreuses à basse altitude | Réduction de la sécurité et du confort à cause d’une moins bonne adhérence véhicule – route<br>Diminution des vitesses, des charges de trafic, etc.<br>Risque accentué d’avalanches et de glissements de terrains<br>Augmentation de la maintenance hivernale à haute altitude et diminution à basse altitude |
| Changement précipitations moyennes en été                         | Précipitations pluvieuses moins nombreuses  | Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule – route   |
| Changement événements de précipitations extrêmes                  | Augmentation nombre et intensité d’événements de précipitations extrêmes  | Risque accentué d’avalanches, de glissements de terrains et d’inondations<br>Réduction de la sécurité et du confort à cause d’une moins bonne adhérence véhicule – route<br>Accessibilité diminuée aux réseaux routiers<br>Diminution des vitesses, des charges de trafic, de la visibilité, etc.             |
| Changement événements de tempêtes extrêmes                        | Augmentation nombre et intensité de tempêtes extrêmes   | Réduction de la sécurité et du confort à cause d’objets tombants sur la route et à l’instabilité des véhicules par vents forts<br>Accessibilité diminuée aux réseaux routiers<br>Diminution des vitesses, des charges de trafic, de la visibilité, etc.   |
| Changement niveau de la mer                                       | Augmentation niveau de la mer   | Risque accentué d’inondations<br>Accessibilité diminuée aux réseaux routiers  |

**Tab. 4.2** – Aperçu des impacts potentiels du changement climatique sur le trafic et les usagers.

## **5. PRÉVISION DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES "ROUTIÈRES" EN SUISSE**

Il existe une multitude de modèles climatiques permettant de prédire l'évolution générale du climat mondial futur. Mais les modèles capables de pronostiquer l'évolution future de différentes conditions météorologiques locales sont peu nombreuses. Grâce à l'utilisation du modèle Meteonorm 7.0 (Chapitre 5.1), le changement des conditions météorologiques dites "routières" a pu être analysé en détail. Il s'agit ici des conditions météorologiques ayant un impact direct sur les infrastructures routières, soit sur les performances de l'infrastructure routière, soit sur le comportement des usagers et des véhicules.

Dans ce chapitre sont décrites dans un premier temps les caractéristiques du modèle climatique de pronostic (Chapitre 5.1), puis l'évolution des conditions météorologiques choisies est analysée de manière détaillée (Chapitres 5.2 à 5.10). Les définitions de ces conditions ont été déterminées par l'auteur de la thèse. Finalement les principaux changements prévus sont résumés à la fin de ce chapitre (Chapitre 5.11).

### **5.1. Modèle climatique de pronostic – Meteonorm 7.0**

Le modèle climatique de pronostic Meteonorm 7.0 permet de modéliser des conditions météorologiques futures. Le modèle permet de décrire l'évolution d'une multitude de caractéristiques météorologiques et ceci pour n'importe quel point géographique dans le monde, pour différents horizons temporels et pour différents scénarios climatiques.

Le modèle a été mis au point par Meteotest AG en collaboration avec l'auteur de la thèse. Une phase d'échange d'idées et de recommandations a permis de mettre au point un produit répondant en premier lieu aux demandes de Meteotest AG, mais en intégrant des considérations utilisables dans le cadre de cette thèse.

Dans ce chapitre est décrit de manière succincte le fonctionnement de l'outil Meteonorm 7.0 (Chapitre 5.1.1) puis la division de la Suisse en régions climatiques est exposée (Chapitre 5.1.2).

#### **5.1.1. Fonctionnement du modèle climatique de pronostic [68]**

Le modèle Meteonorm 7.0 est basé sur une agrégation de 18 modèles généraux de circulation (General circulation models – GCM), décrivant le climat global, issus du rapport IPCC de 2007 [59]. Par la suite, Meteonorm 7.0 utilise une méthode stochastique pour la génération des conditions climatiques au niveau régional et non un modèle climatique régional, comme cela se fait habituellement dans le domaine météorologique. Ceci permet de modéliser le climat régional et même local de manière plus détaillée, faisant intervenir les données météorologiques historiques réelles.

L'utilisation d'une méthode stochastique permet de modéliser non seulement des conditions météorologiques moyennes mais également des conditions extrêmes. Ainsi l'outil permet de modéliser des années représentatives, caractérisées par leurs conditions météorologiques moyennes, leurs conditions extrêmes, mais également la variation (horaire à mensuelle) de ces conditions. La sortie concrète de l'outil consiste donc en la modélisation d'une année "météorologique" représentative, caractérisée par ses conditions météorologiques horaires.

Concernant le phénomène de changement climatique, Meteonorm 7.0 permet de choisir entre trois scénarios d'émission issus du rapport IPCC [59]. Il s'agit des scénarios les plus communément utilisés, composés d'un scénario modéré, d'un scénario moyen et d'un scénario extrême :

- Scénario B1 – un monde intégré et écologique : Croissance économique rapide avec un changement rapide vers une économie de services et d'information ; croissance de la population mondiale jusqu'en 2050 (9 milliards), puis déclin ; diminution sensible de l'intensité matérielle de l'économie et introduction de technologies propres et ménageant les ressources ; accent porté sur des solutions globales vis-à-vis de la stabilité économique, sociale et environnementale.
- Scénario A1B – un monde intégré : Croissance économique rapide ; croissance de la population mondiale jusqu'en 2050 (9 milliards), puis déclin ; introduction rapide de nouvelles technologies efficaces ; diminution des disparités et interactions sociales et culturelles entre les différentes régions (globalisation) ; balance entre l'utilisation d'énergies fossiles et non-fossiles.
- Scénario A2 – un monde hétérogène : Décisions politiques avant tout au niveau national ; orientation avant tout régionale de la croissance économique ; croissance continue de la population mondiale ; évolution technologique plus fragmentée et plus lente.

L'horizon temporel est divisé en périodes de 10 ans, permettant à la fois de modéliser des années représentatives avec des conditions météorologiques moyennes (moyenne sur 10 ans) et des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans). Une modélisation jusqu'en 2100 est possible (période 2100 à 2109).

Uniquement les conditions météorologiques ayant un impact direct sur le domaine du transport routier ont été évaluées (températures, précipitations, etc. – Chapitre 4.2). De même, uniquement les conditions météorologiques suisses ont été analysées. Les différents cas modélisés sont comparés par rapport aux données historiques des différents sites géographiques (période de référence de 1960 à 1990).

### **5.1.2. Régions climatiques suisses**

Afin de faciliter l'analyse des conditions climatiques futures en Suisse, une division en régions climatiques a été effectuée. Celle-ci repose principalement sur les recommandations faites par Meteotest dans le cadre du projet de recherche "Klimatische Grundlagen der Schweiz für die SHRP-Bitumenklassifikation" [3]. Ainsi, les quatre grandes régions climatiques suisses (Jura, Plateau, Alpes, Sud des Alpes) ont été d'avantage divisées et finalement 8 régions climatiques sont analysées : Jura, Bassin lémanique, Plateau (ouest), Plateau (est), Préalpes, Valais, Grisons, et Sud des Alpes (Fig. 5.1).

Dans chaque région climatique, une ville/un village a été choisi(e) pour l'analyse de la prévision des conditions météorologiques "routières". Ces sites ont été choisis en tant que points représentatifs des régions climatiques correspondantes en se focalisant sur les endroits où des constructions routières sont communes. La région du Valais a en outre été subdivisée en deux sites (Sion et Simplon) afin de prendre en considération la très grande gamme d'altitudes présentes dans cette région. Ainsi 9 sites ont été évalués, lesquels sont décrits dans le tableau ci-après (Tab. 5.1).



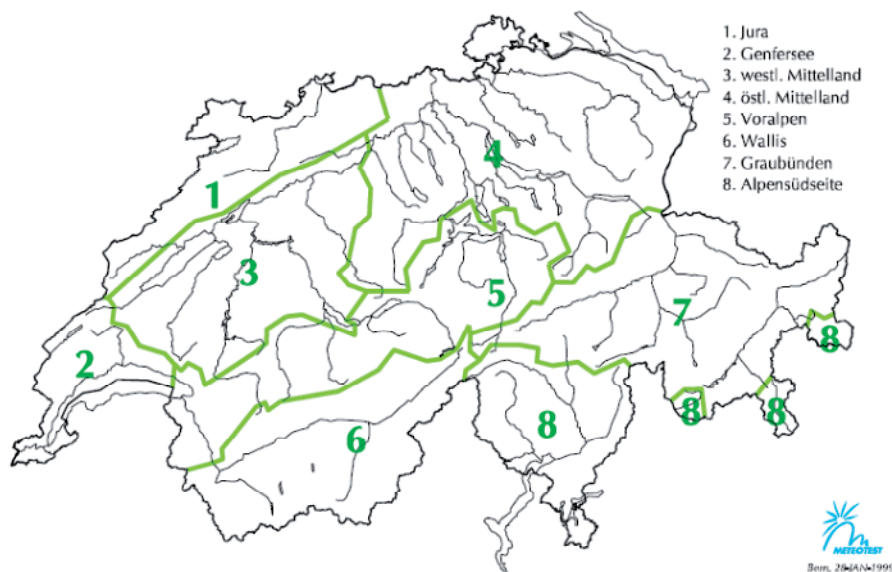


Fig. 5.1 – Régions climatiques suisses selon [3].

| Région climatique | Site géographique | Latitude N [°] | Longitude E [°] | Altitude [m] |
|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|--------------|
| Jura              | La Chaux-de-Fonds | 47.1015        | 6.82477         | 994          |
| Bassin lémanique  | Lausanne          | 46.5200        | 6.63327         | 526          |
| Plateau (ouest)   | Berne             | 46.9484        | 7.43995         | 540          |
| Plateau (est)     | Zurich            | 47.3695        | 8.53885         | 413          |
| Préalpes          | Altdorf           | 46.8809        | 8.643           | 459          |
| Valais            | Sion              | 46.2323        | 7.36086         | 518          |
|                   | Simplon           | 46.1956        | 8.05655         | 1476         |
| Grisons           | Coire             | 46.8511        | 9.52758         | 590          |
| Sud des Alpes     | Lugano            | 46.0045        | 8.95034         | 273          |

Tab. 5.1 – Sites géographiques choisis pour l'analyse de la prévision des conditions météorologiques.

## 5.2. Températures moyennes

### 5.2.1. Température moyenne annuelle

#### Définition

*La température moyenne annuelle correspond à la moyenne des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète.*

La température moyenne annuelle montre une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.2). Par rapport à la période de référence 1960-1990, une augmentation de la température moyenne entre 3.4°C (La Chaux-de-Fonds) et 3.7°C (Lugano) est prévue pour le scénario climatique moyen (A1B) d'ici 2100. Pour le scénario B1 cette augmentation se situe entre 2.2°C (La Chaux-de-Fonds) et 2.4°C (Lugano) et pour le scénario A2, une augmentation se situant entre 3.9°C (La Chaux-de-Fonds) et 4.1°C (Sion) est prévue.

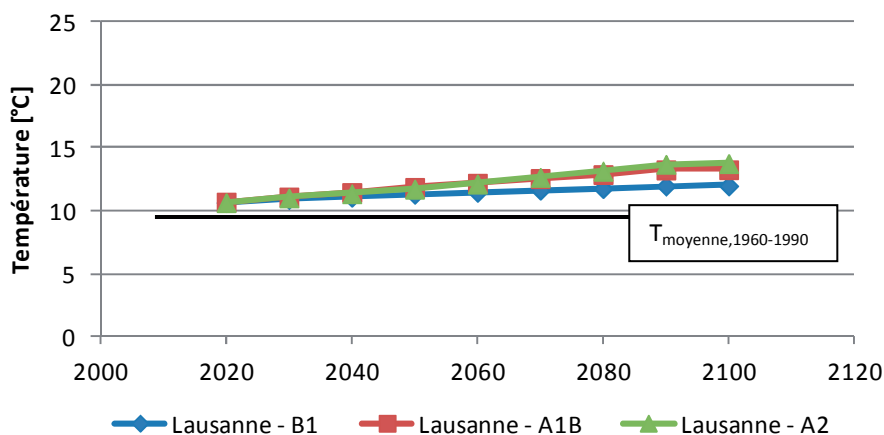


Fig. 5.2 – Température moyenne annuelle pour le site de Lausanne selon les trois scénarios climatiques.

L'augmentation de la température moyenne annuelle est assez proche entre les différents sites géographiques pour les trois scénarios climatiques (Fig. 5.3).

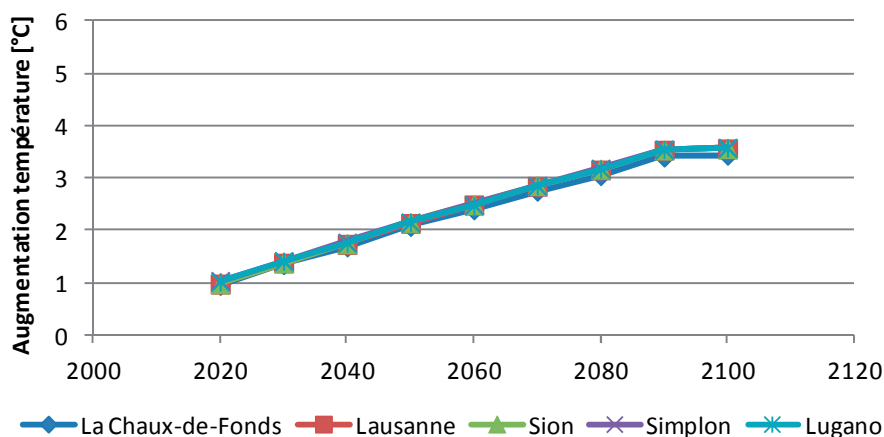


Fig. 5.3 – Augmentation de la température moyenne annuelle par rapport à la période de référence 1960-1990 pour certains sites géographiques (scénario climatique B1).

### 5.2.2. Température moyenne saisonnière

#### Définition

*La température moyenne saisonnière correspond à la moyenne des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Pour les quatre saisons, la température moyenne saisonnière montre une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.4). Une augmentation plus marquée de la température moyenne estivale et automnale (entre 4.1°C (été) et 3.8°C (automne) à Zurich et 4.4°C (été) et 4.0°C (automne) à Sion) est prévue pour le scénario climatique moyen (A1B) d'ici 2100. Pour les hivers et les printemps l'augmentation est plus faible et se situe entre 3.0°C (hiver) et 2.8°C (printemps) à La Chaux-de-Fonds et 3.3°C (hiver) à Lugano et 3.0°C (printemps) au Simplon.

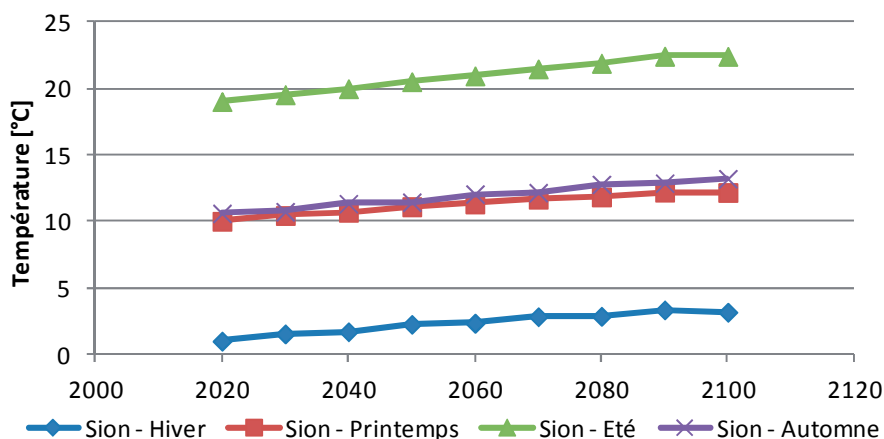


Fig. 5.4 – Température moyenne saisonnière pour le site de Sion selon le scénario climatique A1B.

Pour les scénarios B1 et A2, les mêmes constatations peuvent être faites, mais avec des augmentations plus faibles pour le premier scénario et des augmentations plus fortes pour le deuxième. Par exemple pour le scénario A2, une augmentation de 5.3°C en été à Sion est prévue.

L'augmentation des températures moyennes saisonnières est assez proche entre les différents sites géographiques pour les trois scénarios climatiques. Uniquement les températures moyennes estivales montrent de faibles différences entre les sites analysés à l'horizon 2100 (Fig. 5.5).

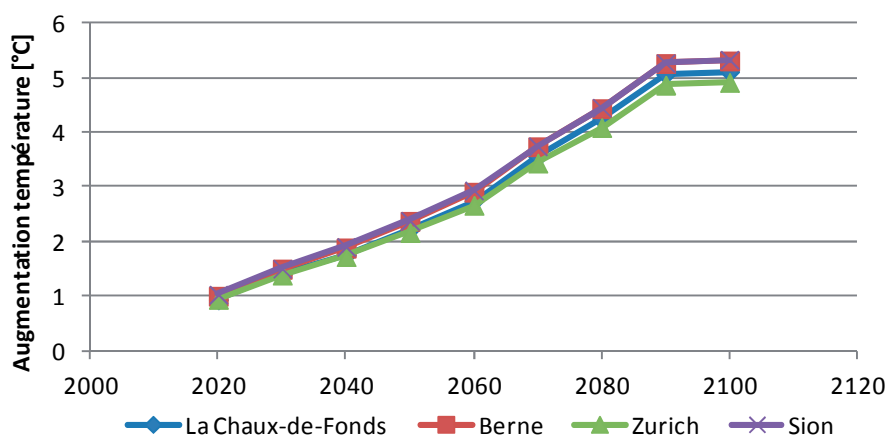


Fig. 5.5 – Augmentation de la température moyenne estivale pour certains sites géographiques (scénario climatique A2).

### 5.2.3. Répartition annuelle des températures

#### Définition

*La répartition annuelle des températures correspond à la courbe de répartition statistique des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète.*

Les courbes de répartition des températures montrent un décalage vers des températures plus élevées et un étalement de la courbe pour tous les sites géographiques et les trois scénarios climatiques d'ici 2100 (Fig. 5.6).

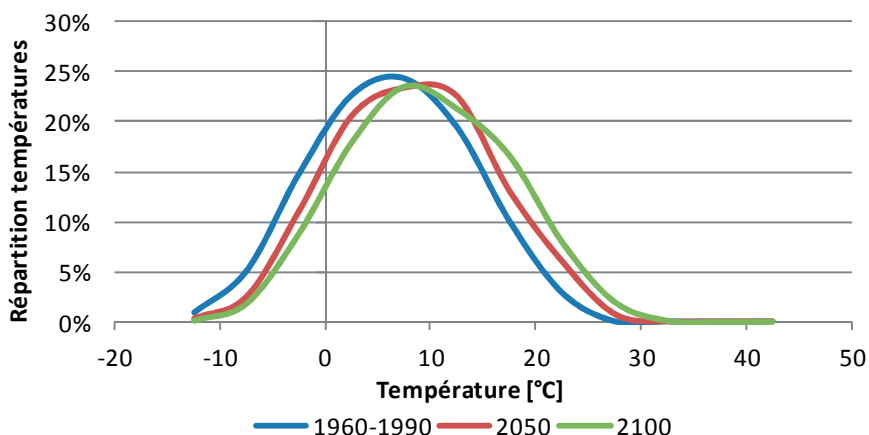


Fig. 5.6 – Courbes de répartition des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B.

Le changement des courbes est plus marqué pour le scénario A2 (décalage et étalement) et moins pour le scénario A1B (Fig. 5.7). Concernant les différents sites géographiques la différence entre ceux-ci est très faible.

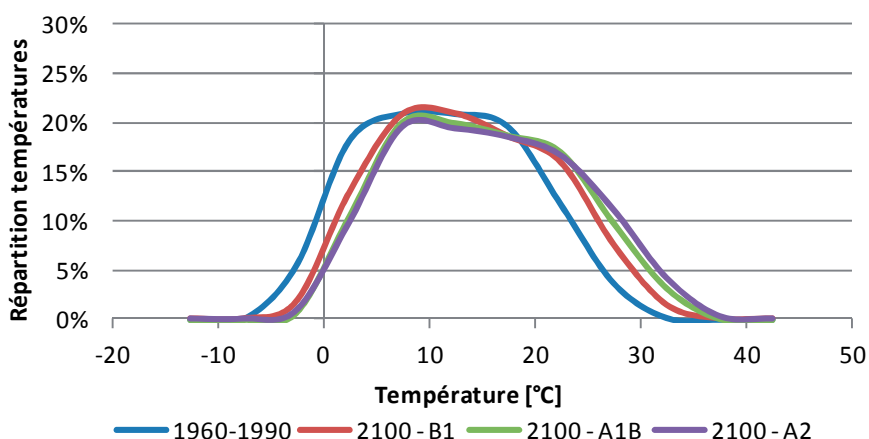


Fig. 5.7 – Courbes de répartition des températures pour le site de Lugano pour les trois scénarios climatiques.

#### 5.2.4. Températures journalières estivales

##### Définition

*Les températures journalières estivales correspondent aux températures horaires de l'air mesurées à 2 m au-dessus du sol pendant le mois de Juillet.*

Les températures journalières estivales montrent un décalage vers des températures plus élevées pour tous les sites géographiques et les trois scénarios climatiques d'ici 2100 (Fig. 5.8). Ceci est vrai aussi bien pour les températures nocturnes que diurnes, même si des différences plus faibles sont prévues la nuit et le matin (02:00 à 12:00) et des différences plus fortes l'après-midi et le soir (14:00 à 22:00).

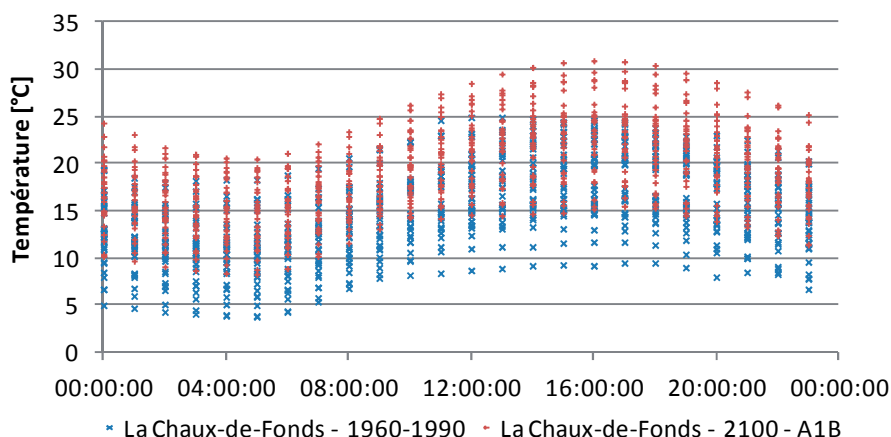


Fig. 5.8 – Températures estivales pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B.

### 5.3. Températures élevées

#### 5.3.1. Température maximale annuelle

##### *Définition*

*La température maximale annuelle correspond à la valeur maximale des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète.*

La température maximale annuelle montre une tendance à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués. L'augmentation est légèrement plus marquée pour les scénarios A1B et A2, mais la différence d'un scénario à l'autre est plutôt faible et le scénario A2 n'indique pas toujours les valeurs les plus élevées (Fig. 5.9).

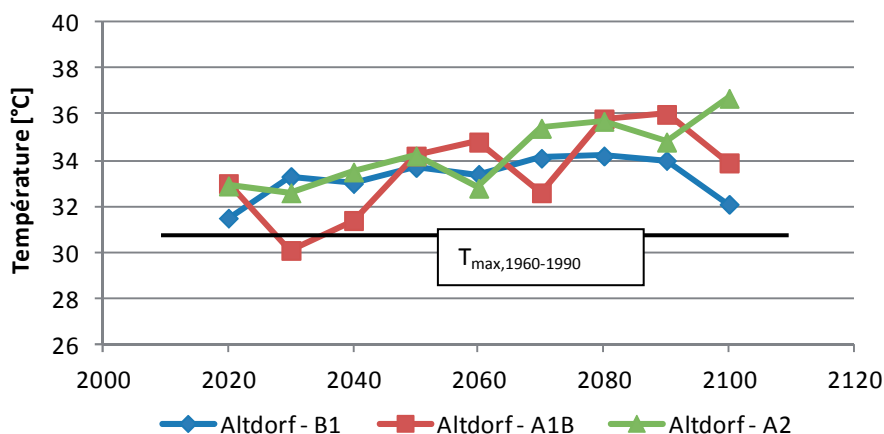


Fig. 5.9 – Température maximale annuelle pour le site de Altdorf selon les trois scénarios climatiques.

Le changement des températures maximales est différent d'un site géographique à un autre. Par exemple une augmentation de la température maximale entre 2.2°C (Lausanne) et 6.0°C (La Chaux-de-Fonds) est prévue pour le scénario climatique moyen (A1B) d'ici 2100 par rapport à la période de référence 1960-1990. Des tendances nettes par rapport à des régions climatiques plus grandes ne sont pas décelables. En effet, des augmentations importantes sont prévues aussi bien au Jura (La Chaux-de-Fonds), sur le Plateau (Zurich) ou encore aux Grisons (Coire) et au Sud des Alpes (Lugano) (Fig. 5.10).

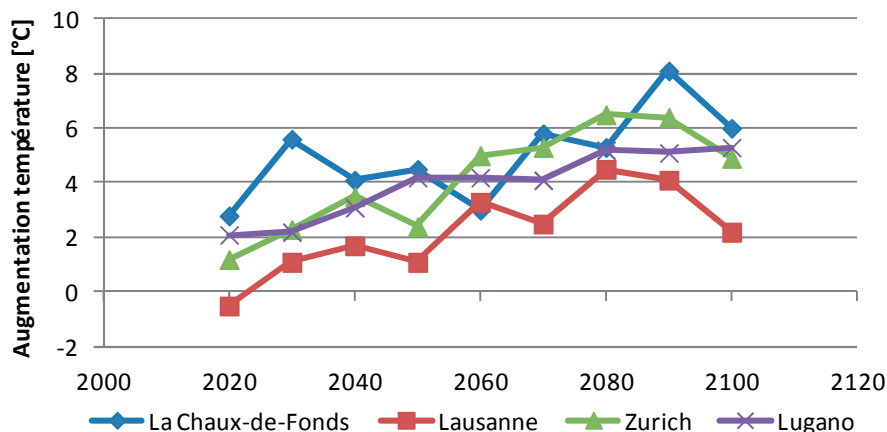


Fig. 5.10 – Augmentation de la température maximale annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Les sites se trouvant plutôt au sud de la Suisse présentent les valeurs de températures les plus élevées, dépassant les 36°C (Lugano, Sion, Coire et Lausanne), à l’exception du Simplon, qui de par son altitude élevée présente les valeurs les plus faibles (inférieures à 30°C), suivies par La Chaux-de-Fonds (autour de 32°C).

Si l’on s’intéresse à l’analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans), des températures maximales annuelles très élevées sont prévues, avec des valeurs proches de 40°C pour plusieurs sites (Lausanne, Altdorf, Sion, Coire, Lugano) (Fig. 5.11). Ici les sites géographiques situés au sud de la Suisse présentent encore les valeurs les plus élevées. Les températures maximales présentent également pour les conditions extrêmes une tendance à l’augmentation.

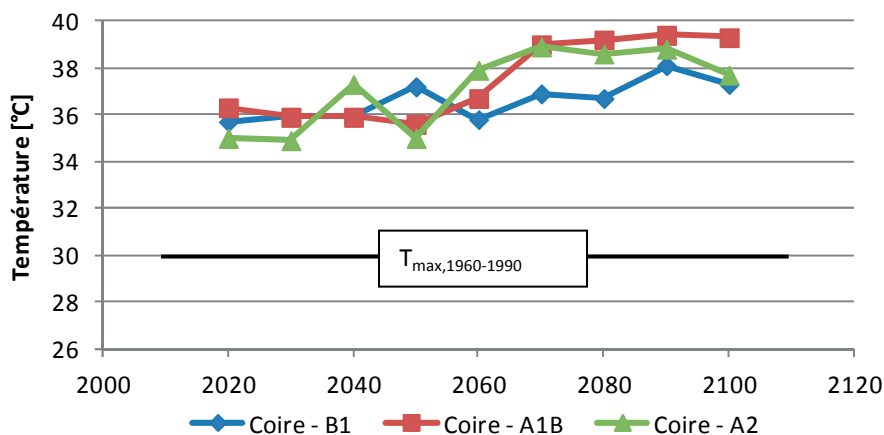


Fig. 5.11 – Température maximale annuelle pour le site de Coire et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

### 5.3.2. Température maximale saisonnière

#### Définition

*La température maximale saisonnière correspond à la valeur maximale des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Pour les quatre saisons, la température maximale saisonnière montre une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.12). Par rapport aux différents sites, une augmentation plus marquée de la température pour une saison donnée n'est pas décelable. En effet, chaque site présente des augmentations saisonnières distinctes, même si une légère tendance à une augmentation plus marquée pour les températures estivales et automnales peut être indiquée. Les différences entre les scénarios climatiques A1B et A2 restent également faibles, tandis que le scénario B1 présente les augmentations les plus basses.

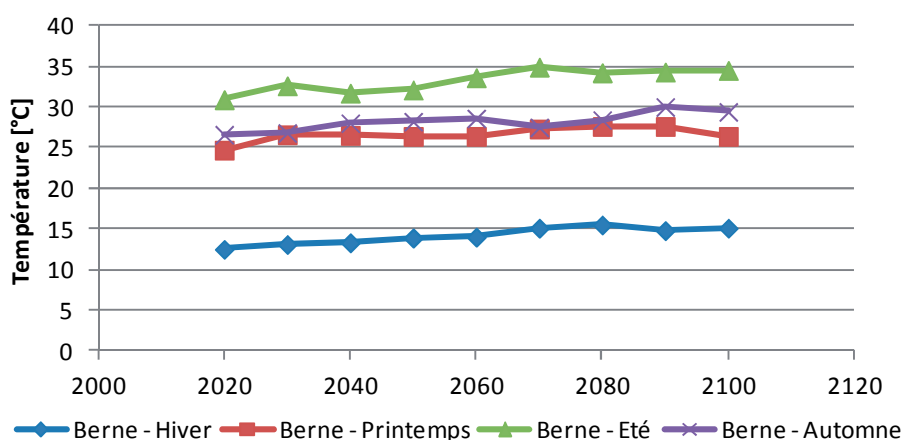


Fig. 5.12 – Température maximale saisonnière pour le site de Berne selon le scénario climatique A1B.

Les températures maximales estivales correspondent toujours aux températures maximales annuelles (Chapitre 5.3.1). Pour les autres saisons, les prévisions montrent des valeurs proches entre les températures maximales printanières et automnales et des valeurs plus faibles pour l'hiver. Des différences notables existent entre les différents sites avec des températures plus élevées pour les sites se trouvant plutôt au sud de la Suisse (Lugano, Sion, Coire et Lausanne) et des températures plus faibles pour les sites à altitude plus élevée (La Chaux-de-Fonds, Simplon).

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des températures maximales hivernales élevées, avec des valeurs dépassant les 20°C pour plusieurs sites (Altdorf, Sion, Coire, Lugano) (Fig. 5.13). Ici les sites géographiques situés au sud de la Suisse présentent encore les valeurs les plus élevées.

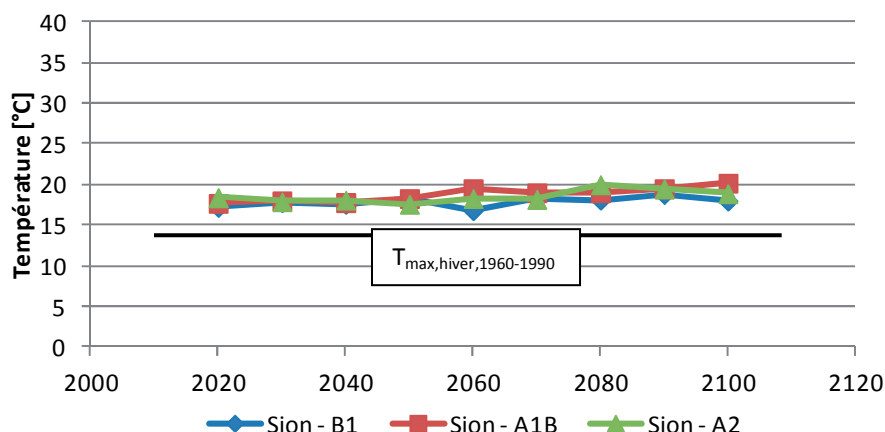


Fig. 5.13 – Température maximale hivernale pour le site de Sion et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

### 5.3.3. Journées chaudes

#### Définition

*Une journée chaude correspond à une journée où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est supérieure à 25/30/35/40°C pendant au moins 1h.*

Le nombre de journées chaudes montre une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. L'augmentation dépend fortement du scénario climatique, avec une augmentation faible pour le scénario B1, une augmentation moyenne pour le scénario A1B et une forte augmentation pour le scénario A2 (Fig. 5.14).

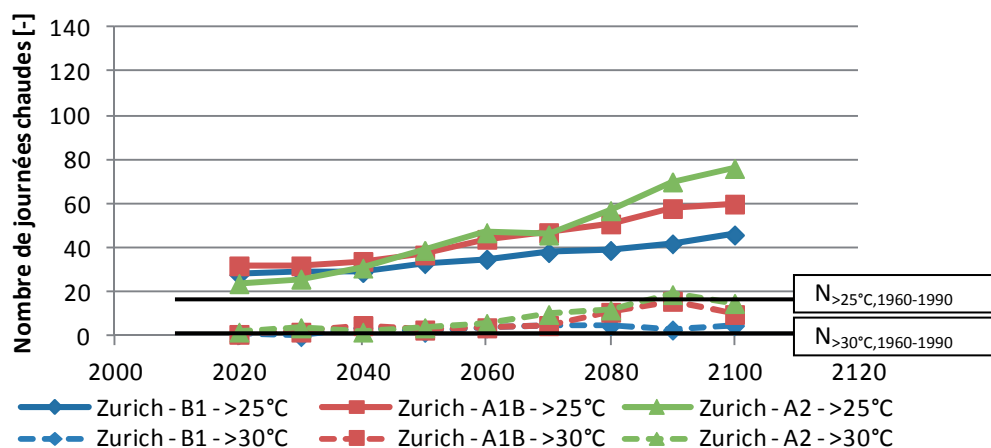


Fig. 5.14 – Nombre de journées chaudes pour le site de Zurich pour des températures de 25°C et 30°C selon les trois scénarios climatiques.

L'augmentation du nombre de journées chaudes est importante pour tous les sites géographiques. Une distinction peut être faite entre les sites à altitude élevée, où des journées chaudes vont apparaître alors que ce n'était pas le cas pour la période 1960-1990 (même pour une température de >25°C), et les autres sites où le nombre peut même quintupler (cas de Berne ; >25°C). Les sites de Lugano, suivi des sites de Lausanne et Sion, présentent le plus grand nombre de journées chaudes, alors que ce nombre est le plus faible pour les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon (Fig. 5.15).



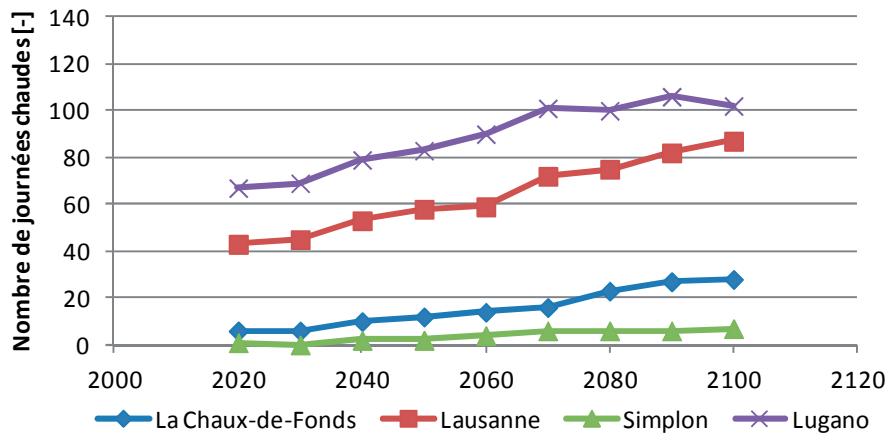


Fig. 5.15 – Nombre de journées chaudes (>25°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Tous les sites à l'exception des sites de La Chaux-de-Fonds, Berne et du Simplon présentent des journées chaudes avec des températures supérieures à 35°C pour le scénario A1B d'ici 2100. Pour le scénario A2, Berne présente également des températures supérieures à 35°C. Plusieurs sites présentent des journées chaudes avec des températures supérieures à 40°C pour le scénario climatique A2.

### 5.3.4. Journées complètes chaudes

#### *Définition*

*Une journée chaude complète correspond à une journée où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est supérieure à 15/20/25°C pendant 24h.*

Le nombre de journées complètes chaudes montre également une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. L'augmentation dépend fortement du scénario climatique, avec une augmentation faible pour le scénario B1 et une forte augmentation pour les scénarios A1B et A2 (Fig. 5.16).

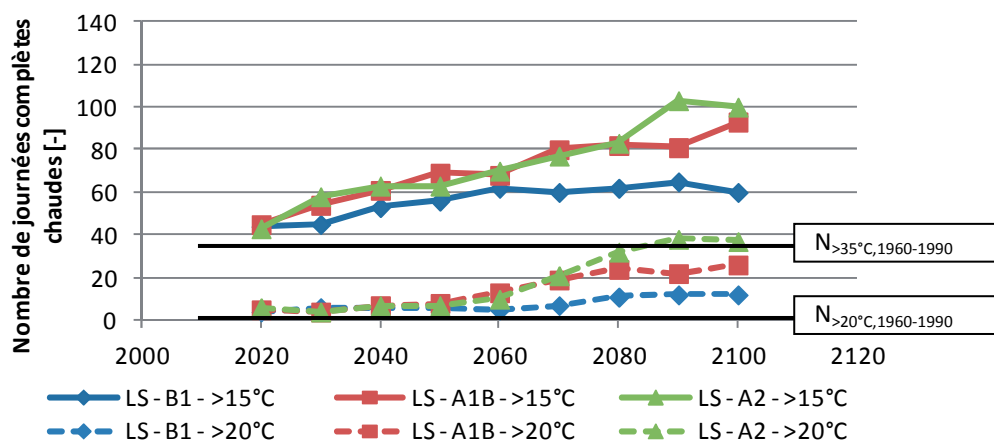


Fig. 5.16 – Nombre de journées complètes chaudes pour le site de Lausanne pour des températures de 15°C et 20°C selon les trois scénarios climatiques.

L'augmentation du nombre de journées complètes chaudes est importante pour tous les sites géographiques. De nouveau, une distinction peut être faite entre les sites à altitude élevée, où des journées complètes chaudes vont apparaître alors que ce n'était pas le cas pour la période 1960-1990 (cas de la température de >20°C), et les autres sites où le nombre peut même quadrupler (cas

de Coire ;  $>15^{\circ}\text{C}$ ). Les sites de Lugano et de Lausanne présentent le plus grand nombre de journées complètes chaudes, alors que ce nombre est le plus faible pour les sites de La Chaux-de-Fonds et le Simplon (Fig. 5.17).

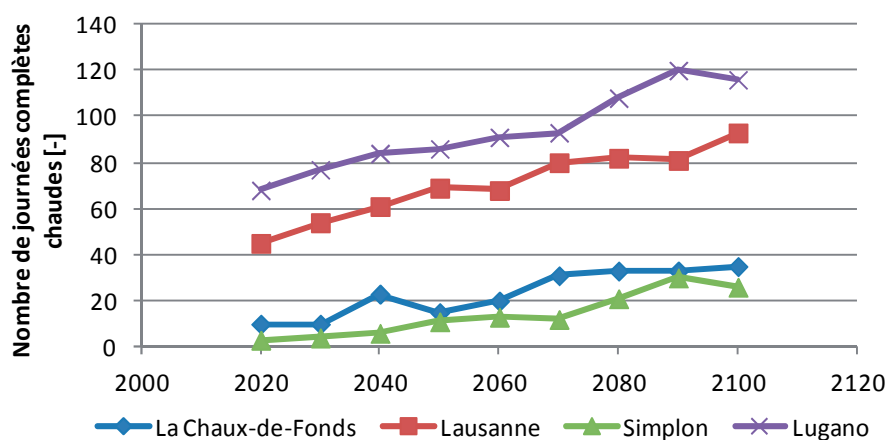


Fig. 5.17 – Nombre de journées complètes chaudes ( $>15^{\circ}\text{C}$ ) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Tous les sites présentent des journées complètes chaudes avec des températures supérieures à  $20^{\circ}\text{C}$  pour le scénario A1B d'ici 2100. Les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon ne présentent aucune journée complète chaude avec des températures supérieures à  $25^{\circ}\text{C}$ , quelque soit le scénario climatique.

### 5.3.5. Périodes chaudes

#### Définition

*Une période chaude correspond à une période où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est supérieure à  $15/20/25^{\circ}\text{C}$  pendant au moins 5 jours consécutifs.*

Le nombre de périodes chaudes montre de manière générale une tendance à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. L'augmentation dépend faiblement du scénario climatique évalué (Fig. 5.18).

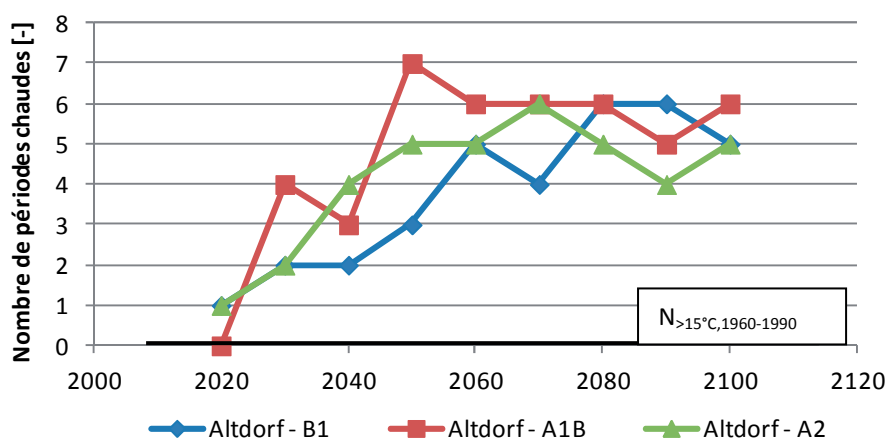


Fig. 5.18 – Nombre de périodes chaudes pour le site de Altdorf pour des températures de  $15^{\circ}\text{C}$  selon les trois scénarios climatiques.

La plupart des sites géographiques vont voir apparaître des périodes chaudes alors qu'ils n'en dénombreraient aucune pour la période 1960-1990. Ainsi, tous les sites vont présenter des périodes chaudes avec une température supérieure à 15°C pour le scénario A2. Pour les scénarios B1 et A1B, tous les sites à l'exception des sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon vont également présenter des périodes chaudes avec une température supérieure à 15°C. Pour des températures supérieures à 20°C, les sites de Lausanne (scénario A2), Altdorf et Sion (scénario A2) et le site de Lugano (tous les trois scénarios) vont voir apparaître des périodes chaudes.

La différence entre les différents sites géographiques est faible, uniquement le site de Lugano (nombre plus élevé de périodes chaudes) et les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon (nombre plus faible) indiquent une réelle différence entre le nombre de périodes chaudes prévues (Fig. 5.19).

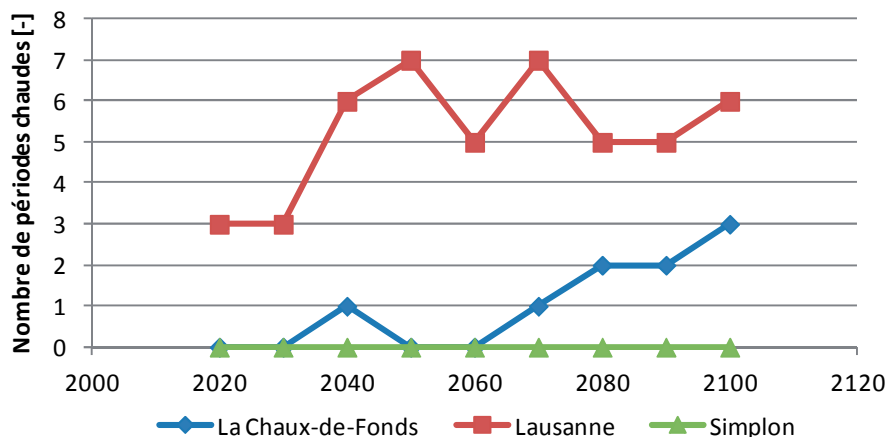


Fig. 5.19 – Nombre de périodes chaudes (>15°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Le site de Lugano présente un cas spécifique, avec une diminution du nombre de périodes chaudes à 15°C et une augmentation du nombre de périodes chaudes à 20°C (Fig. 5.20). Ceci s'explique par l'augmentation de la durée des périodes chaudes, surtout à 15°C où les périodes finissent par se superposer et de ne former que des très longues périodes chaudes.

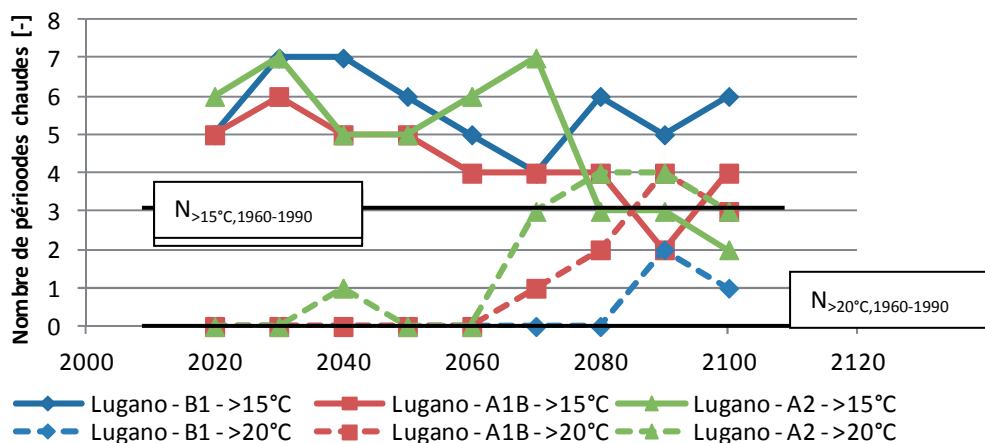


Fig. 5.20 – Nombre de périodes chaudes >15°C et >20°C pour le site de Lugano selon les trois scénarios climatiques.

La durée moyenne des périodes chaudes montre une tendance à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. L'augmentation est particulièrement élevée pour le site de Lugano pour le scénario A2 (Fig. 5.21).

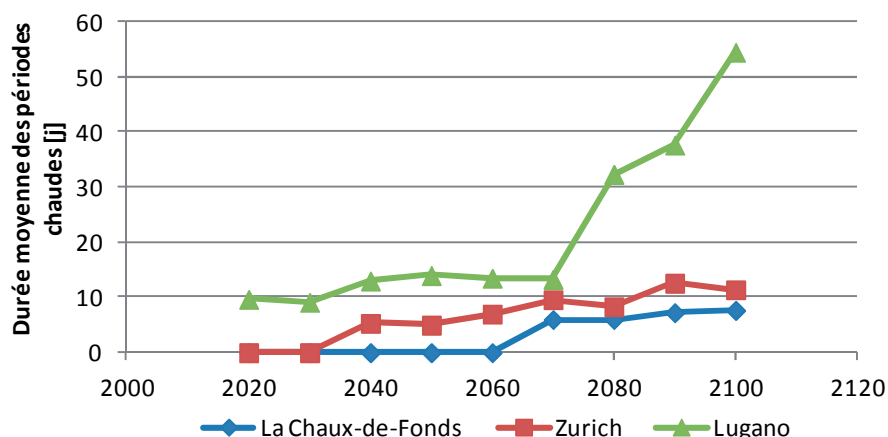


Fig. 5.21 – Durée moyenne des périodes chaudes >15°C pour certains sites géographiques (scénario clim. A2).

## 5.4. Basses températures

### 5.4.1. Température minimale annuelle

#### *Définition*

*La température minimale annuelle correspond à la valeur minimale des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète.*

La température minimale annuelle montre une tendance à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués. L'augmentation est plus marquée pour les scénarios A1B et A2, mais la différence entre ces deux scénarios est plutôt faible et le scénario A2 n'indique pas toujours les valeurs les plus élevées (Fig. 5.22).

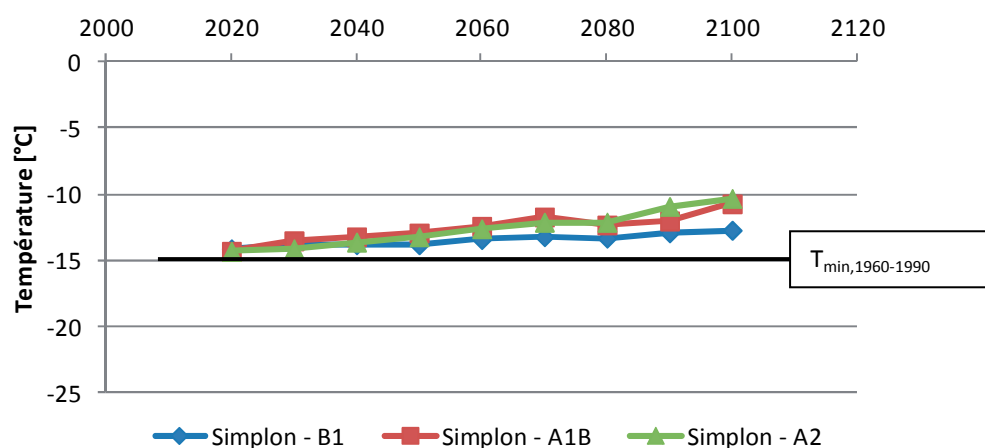


Fig. 5.22 – Température minimale annuelle pour le site du Simplon selon les trois scénarios climatiques.

Le changement des températures minimales peut varier d'un site géographique à un autre. Par exemple une augmentation de la température minimale entre 1.6°C (Sion) et 4.4°C (Simplon) est prévue pour le scénario climatique moyen (A1B) d'ici 2100 par rapport à la période de référence 1960-1990. Des tendances nettes par rapport à des régions climatiques plus grandes ne sont pas décelables. En effet, des augmentations importantes sont prévues pour toutes les régions climatiques (Fig. 5.23).

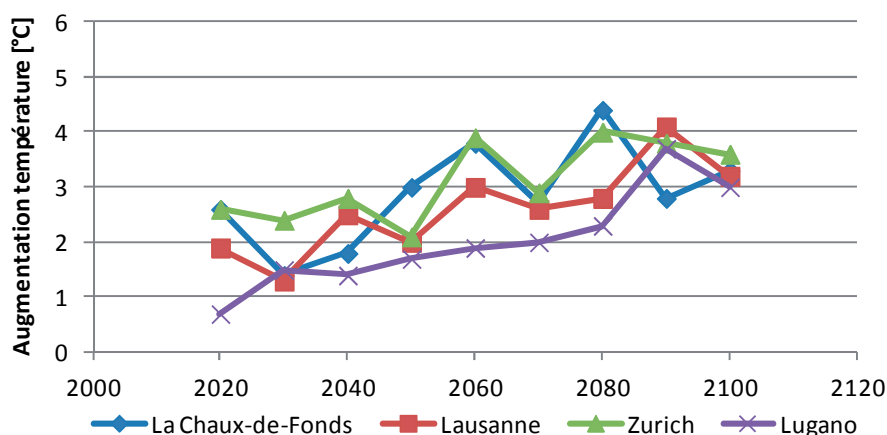


Fig. 5.23 – Augmentation de la température minimale annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Les sites se trouvant à altitude élevée présentent les valeurs de températures minimales les plus faibles dépassant les  $-10^{\circ}\text{C}$  (La Chaux-de-Fonds), alors que les sites à altitude faible présentent les valeurs les plus élevées. Le site de Lugano (Sud des Alpes) présente les valeurs de températures minimales les plus élevées se situant autour de  $-2^{\circ}\text{C}$  d'ici 2100 pour les scénarios A1B et A2.

Si l'on s'intéresse à l'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans), des températures minimales annuelles très basses sont prévues, avec des valeurs proches de  $-20^{\circ}\text{C}$  pour les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon (Fig. 5.24). Ici les sites géographiques situés à altitude élevée présentent encore les valeurs les plus basses. Les températures minimales présentent également pour les conditions extrêmes une tendance à l'augmentation, même si celle-ci reste très faible.

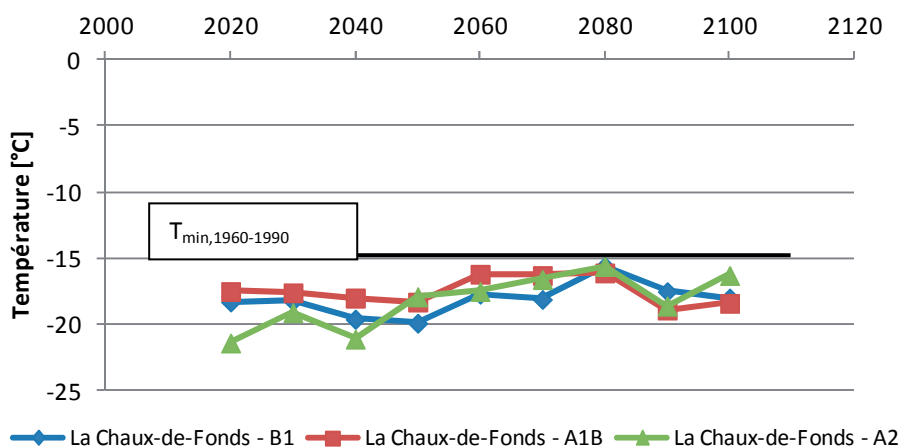


Fig. 5.24 – Température minimale annuelle pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

#### 5.4.2. Température minimale saisonnière

##### Définition

*La température minimale saisonnière correspond à la valeur minimale des températures horaires de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Pour les quatre saisons, la température minimale saisonnière montre une tendance nette à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.25). Par rapport aux différents sites, une augmentation plus

marquée de la température pour une saison donnée n'est pas décelable. En effet, chaque site présente des augmentations saisonnières distinctes. Les différences entre les scénarios climatiques A1B et A2 restent également faibles, tandis que le scénario B1 présente des augmentations plus faibles.

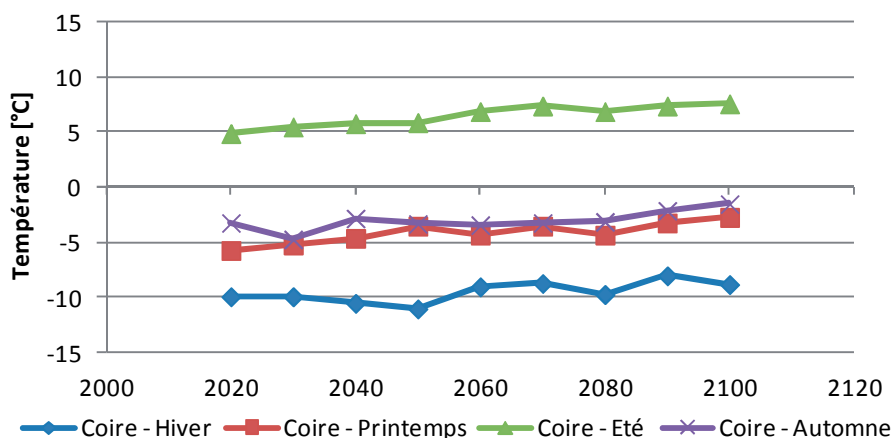


Fig. 5.25 – Température minimale saisonnière pour le site de Coire selon le scénario climatique A1B.

Les températures minimales hivernales correspondent toujours aux températures minimales annuelles (Chapitre 5.4.1). Pour les autres saisons, les prévisions montrent des valeurs proches entre les températures minimales printanières et automnales et des valeurs plus élevées pour l'été. Des différences notables existent entre les différents sites avec des températures plus élevées pour les sites se trouvant plutôt au sud de la Suisse (Lugano, Sion, Coire et Lausanne) et des températures plus faibles pour les sites à altitude plus élevée (La Chaux-de-Fonds, Simplon). Par exemple les températures minimales estivales pour les sites du Simplon et de La Chaux-de-Fonds sont inférieures à 5°C, alors que pour le site de Lugano les températures minimales estivales ne sont supérieures à 10°C.

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des températures minimales estivales basses, avec des valeurs inférieures à 0°C pour les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon pour plusieurs cas modélisés (Fig. 5.26). Ici les sites géographiques situés au sud de la Suisse présentent encore les valeurs les plus élevées.

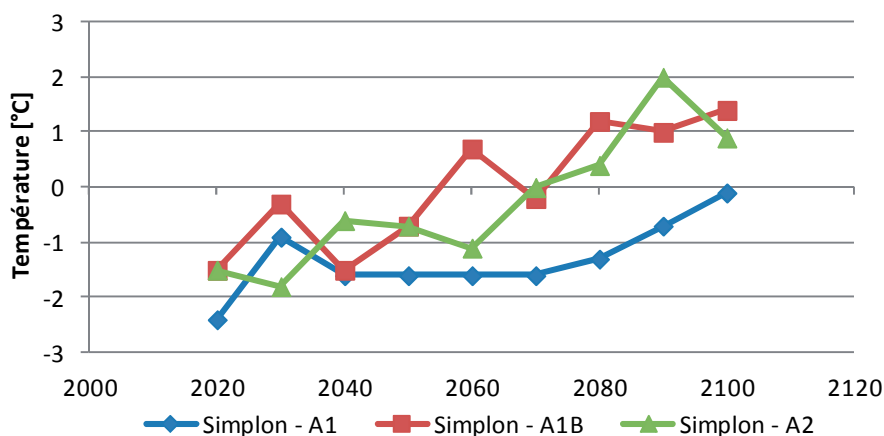


Fig. 5.26 – Température minimale estivale pour le site du Simplon et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

### 5.4.3. Journées froides

#### Définition

*Une journée froide correspond à une journée où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est inférieure à 0/-5/-10°C pendant au moins 1h.*

Le nombre de journées froides montre une tendance nette à la baisse jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. La diminution dépend moyennement du scénario climatique, avec une diminution faible pour le scénario B1 et moyenne pour les scénarios A1B et A2 (Fig. 5.27).

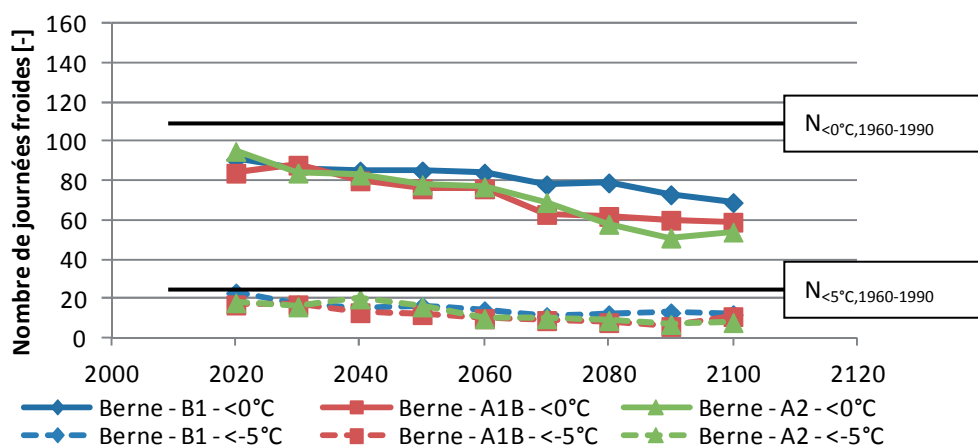


Fig. 5.27 – Nombre de journées froides pour le site de Berne pour des températures de 0°C et -5°C selon les trois scénarios climatiques.

La diminution du nombre de journées froides est importante pour tous les sites géographiques. Une distinction peut être faite entre les sites à altitude élevée, où des journées froides vont toujours apparaître mais en nombre plus faible par rapport à la période 1960-1990, et les autres sites où les journées froides avec des températures inférieures à -5°C vont presque disparaître. Les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon présentent le plus grand nombre de journées froides, alors que ce nombre est le plus faible pour les sites de Lugano et Lausanne (Fig. 5.28).

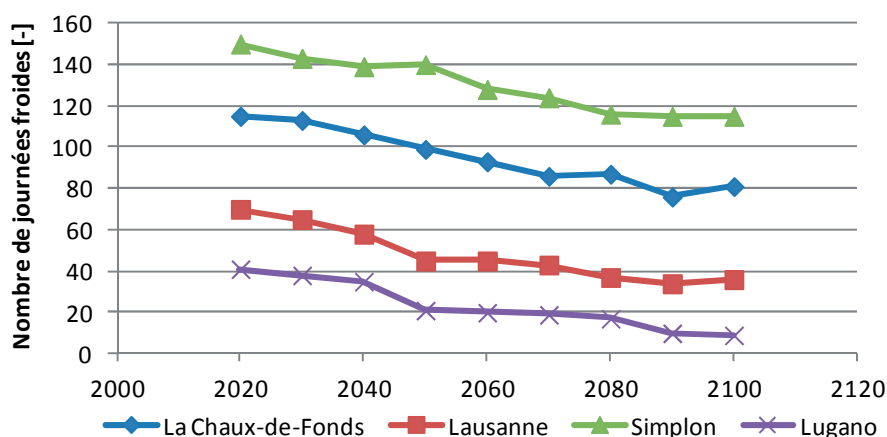


Fig. 5.28 – Nombre de journées froides (<0°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

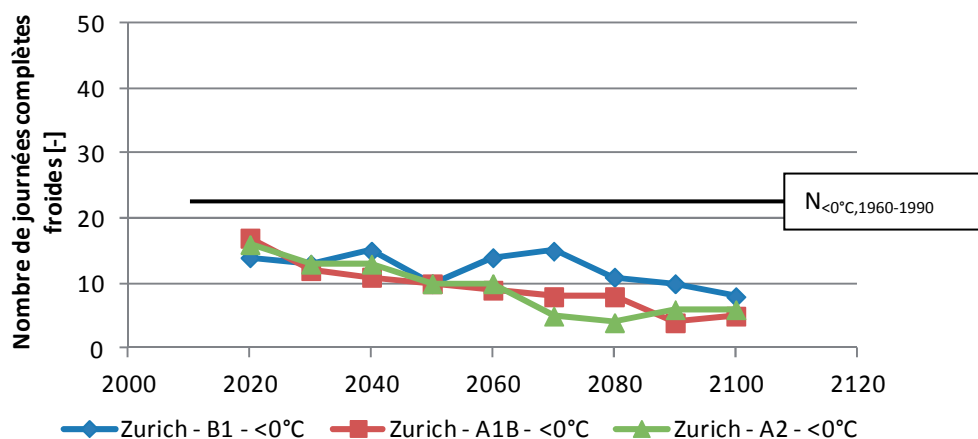
Uniquement les sites de La Chaux-de-Fonds et du Simplon présentent des journées froides avec des températures inférieures à -10°C pour tous les scénarios jusqu'en 2100. Les sites de Berne, Zurich et Coire peuvent présenter quelques cas isolés de telles journées froides.

#### 5.4.4. Journées complètes froides

##### Définition

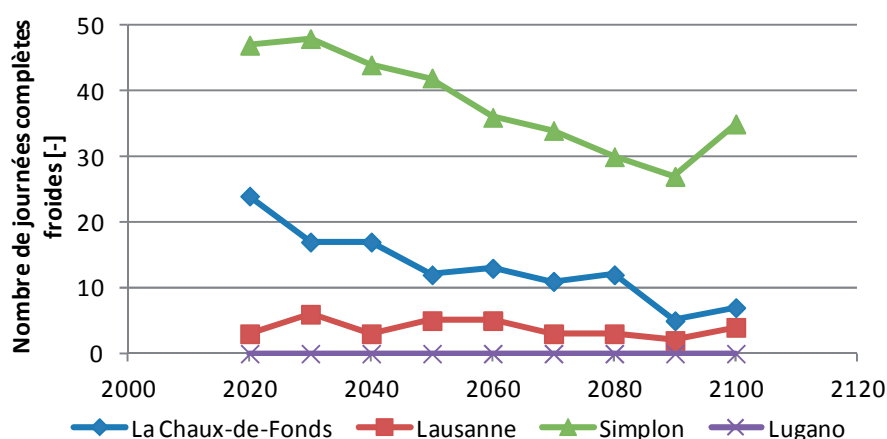
*Une journée froide complète correspond à une journée où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est inférieure à 0/-5°C pendant 24h.*

Le nombre de journées complètes froides montre également une tendance nette à la diminution jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques, pour tous les sites géographiques évalués et pour toutes les températures analysées. La diminution dépend faiblement du scénario climatique, avec une diminution faible pour le scénario B1 et une diminution légèrement plus élevée pour les scénarios A1B et A2 (Fig. 5.29).



**Fig. 5.29** – Nombre de journées complètes froides pour le site de Zurich pour des températures de 0°C selon les trois scénarios climatiques.

La diminution du nombre de journées complètes froides est importante pour tous les sites géographiques. De nouveau, une distinction peut être faite entre les sites à altitude élevée, où des journées complètes froides restent plus nombreuses, et les autres sites où le nombre peut même disparaître complètement (cas de Lugano pour des températures inférieures à 0°C) (Fig. 5.30).



**Fig. 5.30** – Nombre de journées complètes froides (<0°C) pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Uniquement le site du Simplon présente des journées complètes froides avec des températures inférieures à -5°C pour tous les scénarios d'ici 2100. Certains autres sites peuvent présenter quelques cas isolés de telles journées froides (La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Berne, Zurich, Altdorf, Coire).



### 5.4.5. Périodes froides

#### Définition

*Une période froide correspond à une période où la température de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est inférieure à 0°C pendant au moins 5 jours consécutifs.*

Le nombre de périodes froides montre de manière générale une légère tendance à la diminution jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués. La diminution dépend faiblement du scénario climatique évalué (Fig. 5.31).

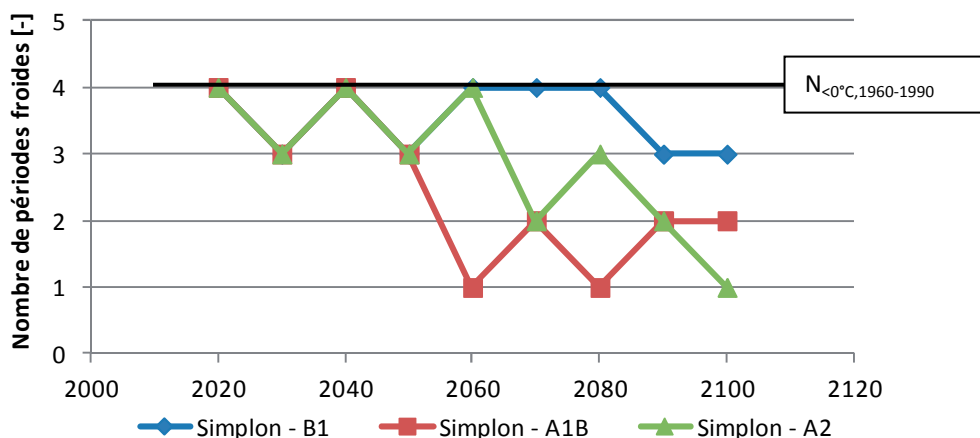


Fig. 5.31 – Nombre de périodes froides pour le site du Simplon selon les trois scénarios climatiques.

La plupart des sites géographiques vont voir disparaître complètement leurs périodes froides. Uniquement le site du Simplon va présenter des périodes froides jusqu'en 2100 (Fig. 5.31). Le deuxième site à altitude élevée, La Chaux-de-Fonds, présente déjà seulement un cas pour la période de référence 1960-1990. Les autres sites peuvent présenter quelques cas isolés de telles périodes froides (Berne, Zurich). La différence entre les différents sites géographiques est très faible, uniquement le site du Simplon (nombre plus élevé de périodes froides) indique une réelle différence avec les autres sites.

La durée moyenne des périodes froides montre une légère tendance à la diminution jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle pour le site du Simplon et pour les trois scénarios climatiques (Fig. 5.32). Pour les autres sites, le nombre de périodes froides est trop faible pour pouvoir distinguer une tendance.

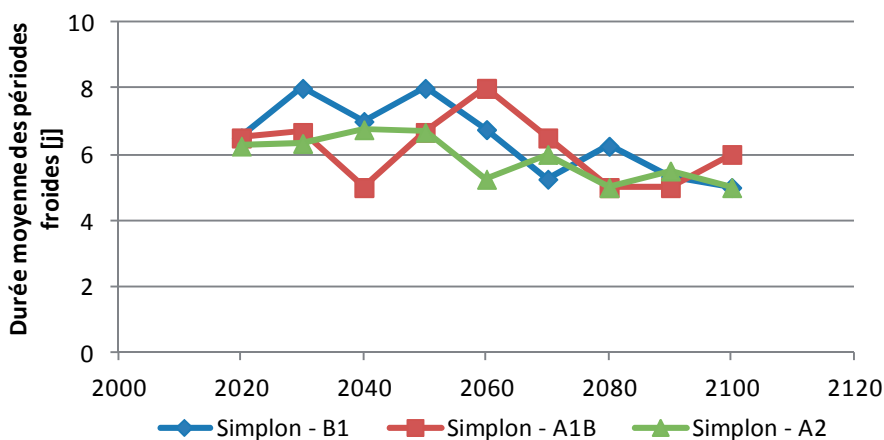


Fig. 5.32 – Durée moyenne des périodes froides pour le site du Simplon et pour les trois scénarios climatiques.

## 5.5. Variation des températures

### 5.5.1. Variation annuelle maximale

#### Définition

*La variation annuelle maximale correspond à la valeur maximale des différences de températures annuelles de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète.*

La variation annuelle maximale de la température montre une très faible tendance à l'augmentation jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.33). Les valeurs sont légèrement plus élevées par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Ceci indique que les températures maximales estivales augmentent d'avantage que les températures minimales hivernales. Le site de Lugano présente la plus faible variation maximale (entre 37 et 39°C) et le site de Coire la plus élevée (entre 42 et 46°C). Il n'existe aucune différence marquée entre les trois scénarios climatiques.

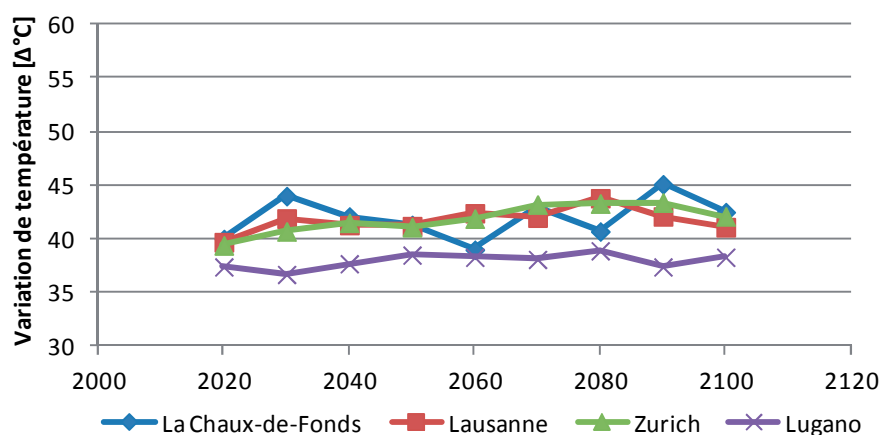


Fig. 5.33 – Variation annuelle maximale des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des variations annuelles maximales plus élevées, avec des valeurs supérieures à 50°C pour les sites de La Chaux-de-Fonds et de Coire pour plusieurs cas modélisés (Fig. 5.34). Lugano présente encore les valeurs les plus faibles, se situant entre 44 et 47°C.

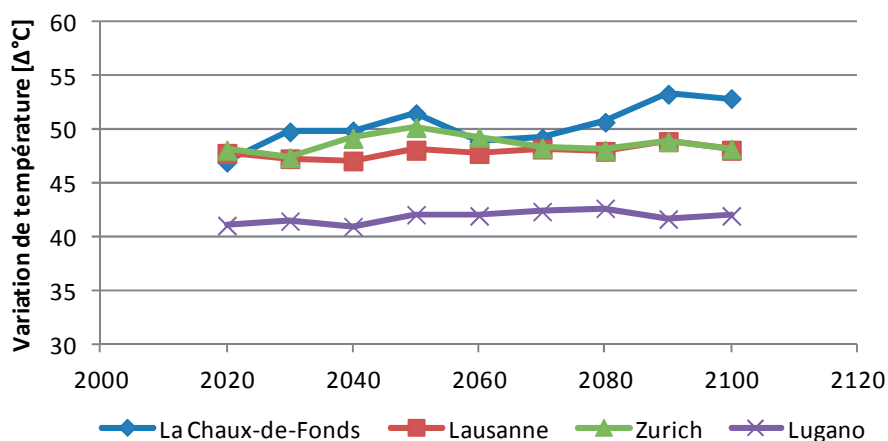


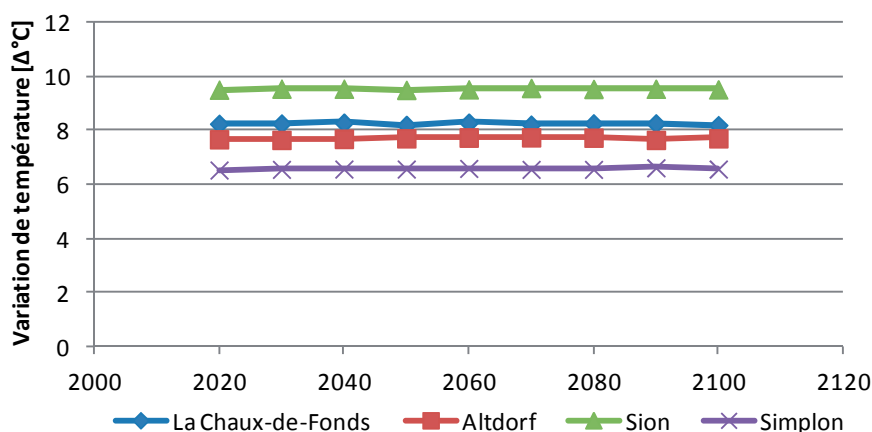
Fig. 5.34 – Variation annuelle maximale des températures pour certains sites géographiques et pour des conditions extrêmes géographiques (scénario climatique A1B).

### 5.5.2. Variation journalière moyenne (annuelle et saisonnière)

#### Définition

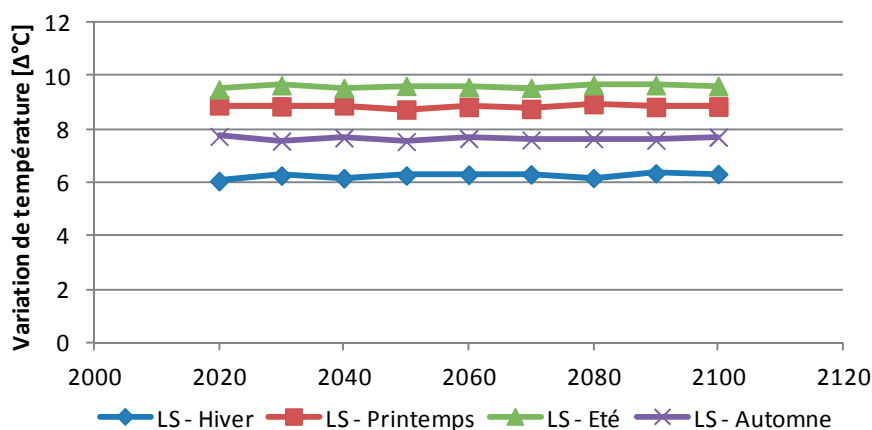
*La variation journalière moyenne correspond à la moyenne des différences de températures journalières de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

La variation journalière de la température ne montre aucune tendance pour la moyenne annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.35). Les valeurs restent constantes par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site du Simplon présente la plus faible variation moyenne (environ 6.6°C) et le site de Sion la plus élevée (environ 7.7°C). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.



**Fig. 5.35** – Variation journalière moyenne annuelle des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

La variation journalière de la température ne montre également aucune tendance pour les moyennes saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.36). Les valeurs restent constantes par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Les variations moyennes sont toujours le plus élevées pour l'été, suivi du printemps, puis de l'automne et finalement de l'hiver. Les variations estivales et printanières peuvent être très proches, de même que les variations automnales et hivernales. La différence maximale entre les valeurs estivales et hivernales se rencontre pour le site de Lausanne (différence d'environ 4°C).



**Fig. 5.36** – Variations journalières moyennes saisonnières des températures pour le site de Lausanne (scénario climatique A1B).

### 5.5.3. Variation journalière maximale (annuelle et saisonnière)

#### Définition

La variation journalière maximale correspond à la valeur maximale des différences de températures journalières de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).

La variation journalière maximale de la température ne montre aucune tendance nette pour la valeur maximale annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Pour certains sites une légère tendance est visible, tel que le site de La Chaux-de-Fonds (Fig. 5.37), mais celle-ci peut aussi bien être positive que négative. Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Il n'est pas non plus possible de relever une tendance par rapport aux scénarios climatiques. Les sites de La Chaux-de-Fonds et de Berne présentent les variations les plus élevées (entre 16 et 19°C), alors que le site du Simplon présente les variations les plus faibles (entre 12 et 15°C). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

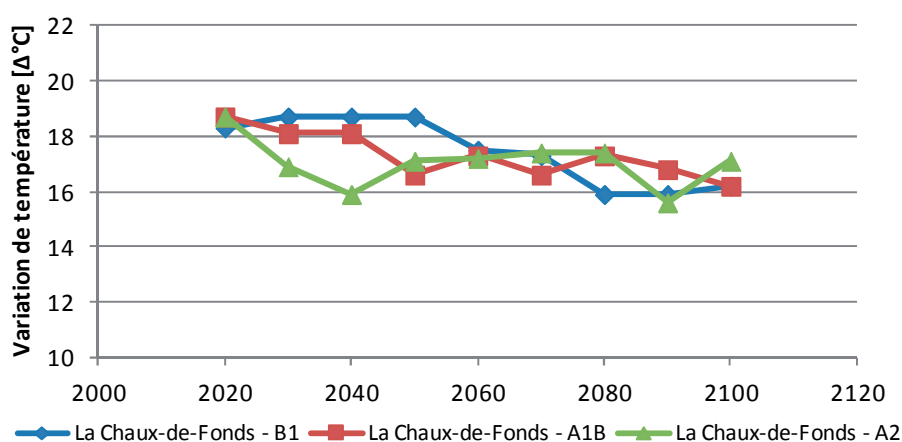


Fig. 5.37 – Variation journalière maximale annuelle des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour les trois scénarios climatiques.

La variation journalière maximale de la température ne montre également aucune tendance nette pour les valeurs maximales saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.38). Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Les variations maximales sont très proches entre les quatre saisons, aucune tendance n'est visible non plus de ce côté.

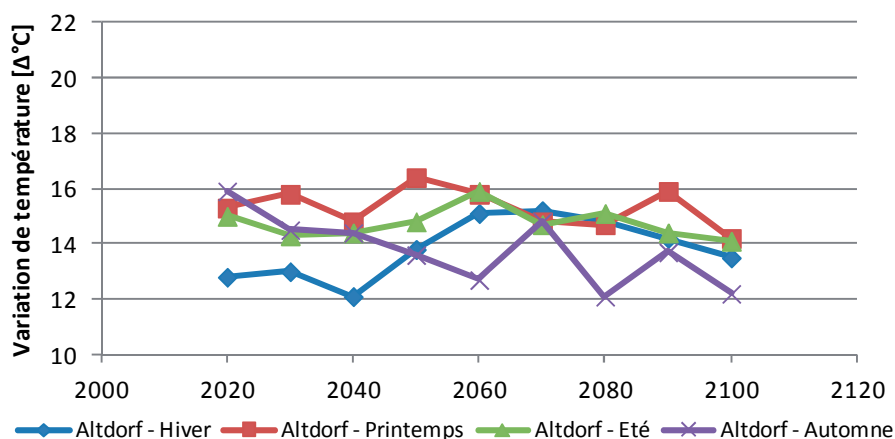


Fig. 5.38 – Variations journalières maximales saisonnières des températures pour le site de Altdorf (scénario climatique A1B).

Si l'on s'intéresse à l'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans), des variations journalières maximales annuelles élevées peuvent être atteintes. Celles-ci se situent entre 15 et 25°C pour tous les sites géographiques à l'exception du site du Simplon, où des valeurs plus faibles sont prévues (entre 13 et 16°C). Aucune tendance ne ressort de la prévision des conditions météorologiques futures jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.39).

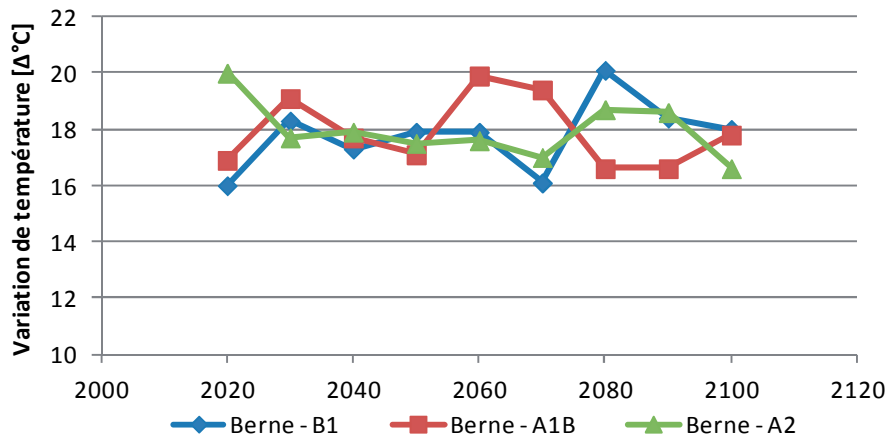


Fig. 5.39 – Variations journalières maximales annuelles des températures pour le site de Berne et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

#### 5.5.4. Variation journalière minimale (annuelle et saisonnière)

##### Définition

*La variation journalière minimale correspond à la valeur minimale des différences de températures journalières de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

La variation journalière minimale de la température ne montre aucune tendance pour la valeur minimale annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.40). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Tous les sites présentent des variations comprises entre 1 et 3°C. Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

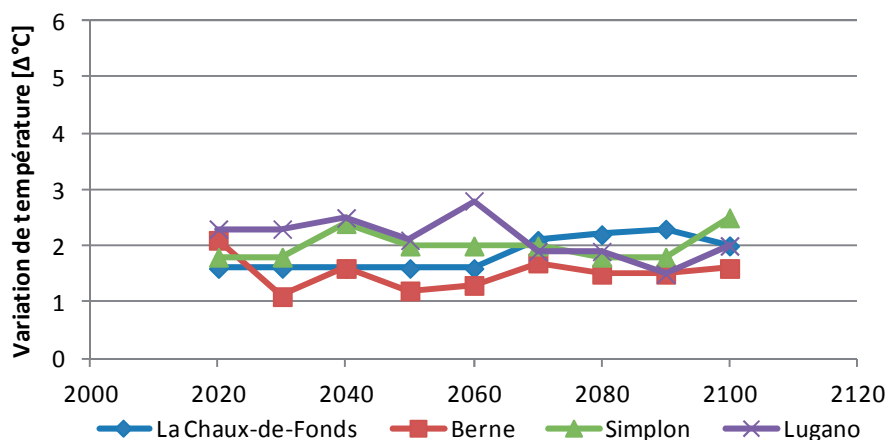


Fig. 5.40 – Variation journalière minimale annuelle des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

La variation journalière minimale de la température ne montre également aucune tendance pour les valeurs minimales saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.41). Les variations minimales sont très proches entre les quatre saisons, aucune tendance n'est visible non plus de ce côté. Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990.

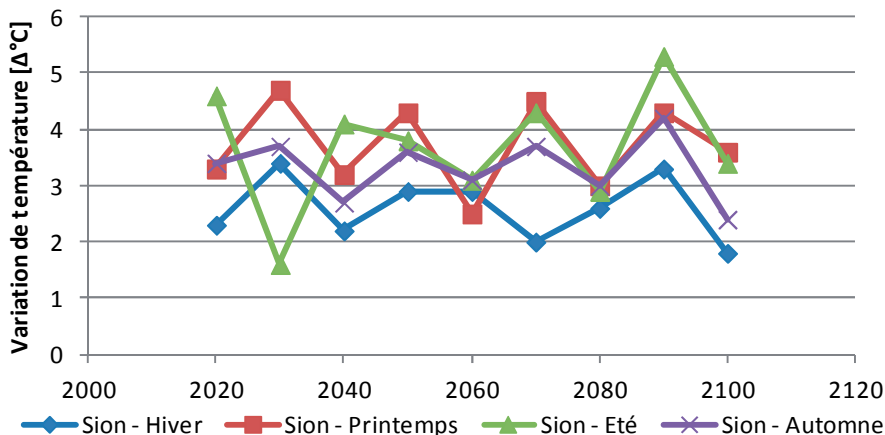


Fig. 5.41 – Variations journalières minimales saisonnières des températures pour le site de Sion (scénario climatique A1B).

### 5.5.5. Variation horaire maximale (annuelle et saisonnière)

#### Définition

*La variation horaire maximale correspond à la valeur maximale des différences positives/négatives de températures entre deux heures consécutives de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

La variation horaire maximale positive et négative de la température ne montre aucune tendance pour la valeur maximale annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.42). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Tous les sites présentent des variations positives comprises entre 3 et 4.5°C, à l'exception des sites de La Chaux-de-Fonds (variations entre 5 et 5°C) et du Simplon (variations entre 2 et 3°C). Les variations négatives sont toujours plus faibles, avec des valeurs situées entre 2 et 3°C pour tous les sites. Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques pour les valeurs positives et négatives.

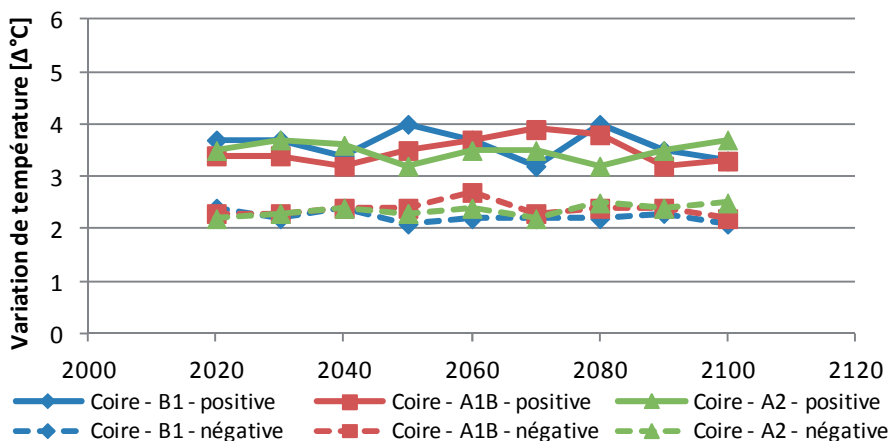


Fig. 5.42 – Variation horaire maximale annuelle positive et négative des températures pour le site de Coire et pour les trois scénarios climatiques.

D'un point de vue de la variation horaire maximale saisonnière des températures, celles-ci ne montrent également aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.43). Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Les variations positives sont généralement plus élevées pour la saison hivernale et plus faibles pour la saison estivale. Les sites présentent des valeurs proches (entre 2 et 5°C selon la saison), à l'exception du site du Simplon, où les valeurs sont plus faibles pour les quatre saisons (entre 1.7 et 3.1°C). Les variations négatives sont toujours plus faibles, avec des valeurs situées entre 1.5 et 3.5°C pour tous les sites et quelque soit la saison. Les quatre saisons présentent des valeurs négatives très proches.

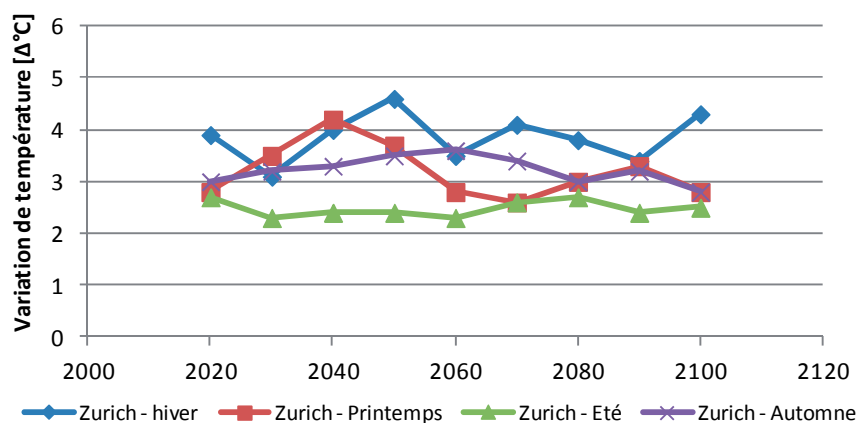


Fig. 5.43 – Variations horaires saisonnières positives des températures pour le site de Zurich (scénario climatique A1B).

### 5.5.6. Variation maximale en 6h (annuelle et saisonnière)

#### Définition

*La variation maximale en 6h correspond à la valeur maximale des différences positives/négatives de températures entre 6 heures consécutives de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

La variation maximale en 6h, positive et négative, de la température ne montre aucune tendance nette pour la valeur maximale annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.44). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 et il n'existe aucune différence majeure entre les trois scénarios climatiques.

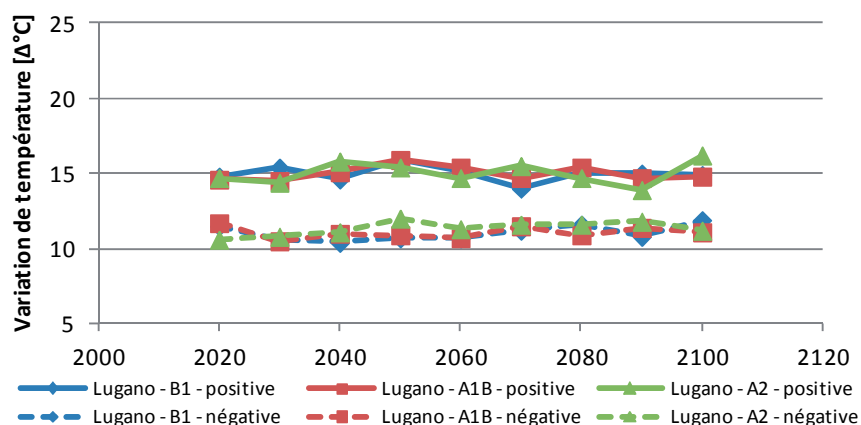


Fig. 5.44 – Variation maximale en 6h annuelle positive et négative des températures pour le site de Lugano et pour les trois scénarios climatiques.

Les variations positives varient en fonction du site, elles sont les plus faibles pour le site du Simplon (entre 9 et 11°C) et les plus élevées pour le site de La Chaux-de-Fonds (entre 14 et 17°C) (Fig. 5.45). Les variations négatives sont toujours plus faibles que les variations positives. Elles varient très peu en fonction du site et se situent entre 10 et 13.5°C pour tous les sites, à l'exception du site du Simplon, où des variations légèrement plus faibles sont prévues (entre 9 et 10.5°C).

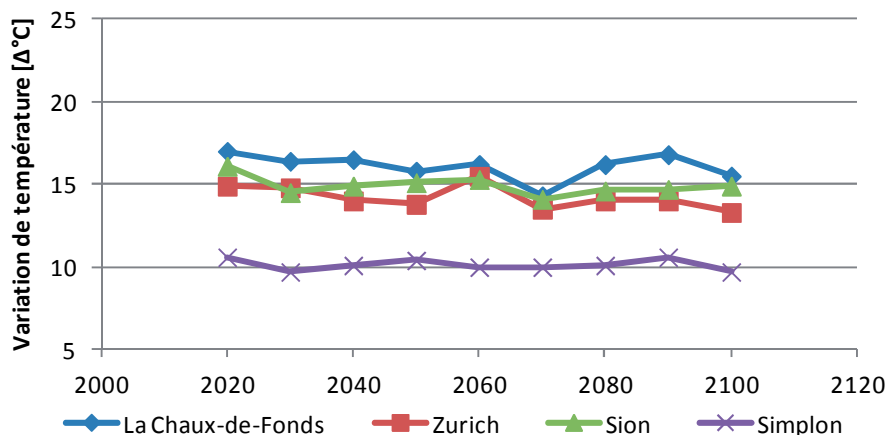


Fig. 5.45 – Variation maximale en 6h annuelle positive des températures pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

D'un point de vue de la variation horaire en 6h saisonnière des températures, celles-ci ne montrent également aucune tendance nette jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.46). Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 et il n'existe aucune différence majeure entre les trois scénarios climatiques.

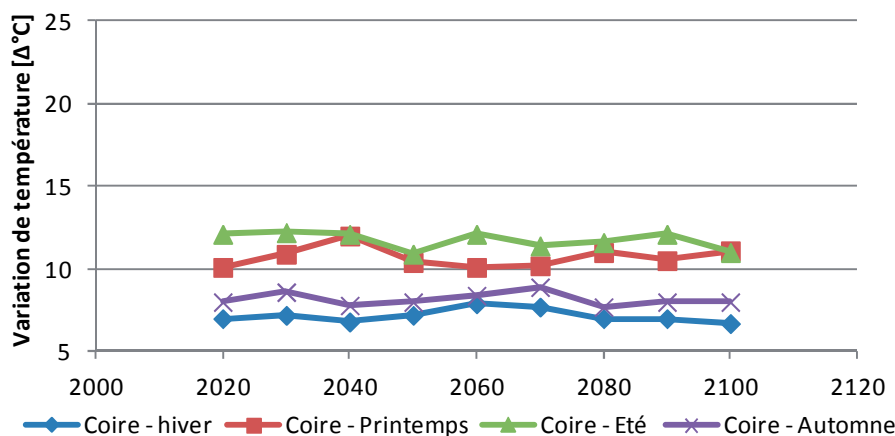


Fig. 5.46 – Variations en 6h saisonnières négatives des températures pour le site de Coire (scénario climatique A1B).

Les variations positives ont tendance à être plus faibles pour la saison estivale et plus élevées pour les trois autres saisons, sans différence notable entre ces trois dernières. Les sites présentent des valeurs proches entre eux (entre 8.5 et 11°C), à l'exception du site du Simplon, où les valeurs sont plus faibles pour les quatre saisons (entre 8.5 et 11°C). Le site du Simplon présente en outre une très faible différence entre les variations positives des différentes saisons, alors que pour les autres sites des différences plus grandes sont prévues.



Les variations négatives sont toujours plus faibles que les variations positives et dépendent d'avantage des saisons. Elles ont tendance à être plus faibles pour les saisons hivernales et automnales et plus élevées pour les saisons estivales et printanières, sans différence notable entre chaque groupe. Les sites présentent des valeurs négatives proches entre eux, même le site du Simplon présente des variations hivernales et printanières proches des autres sites. Néanmoins ce site présente des variations estivales et automnales plus faibles par rapport aux autres sites. Les sites de La Chaux-de-Fonds et du Lugano présentent de leur côté des variations hivernales et printanières légèrement plus élevées que les autres sites.

Si l'on s'intéresse à l'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans), des variations maximales en 6h annuelles légèrement plus élevées peuvent être atteintes. Cette différence peut atteindre les +4°C pour les variations positives et les +3°C pour les variations négatives. Le site de La Chaux-de-Fonds indique les plus grandes différences par rapport aux conditions standards. Aucune tendance ne ressort de la prévision des conditions météorologiques futures jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.47).

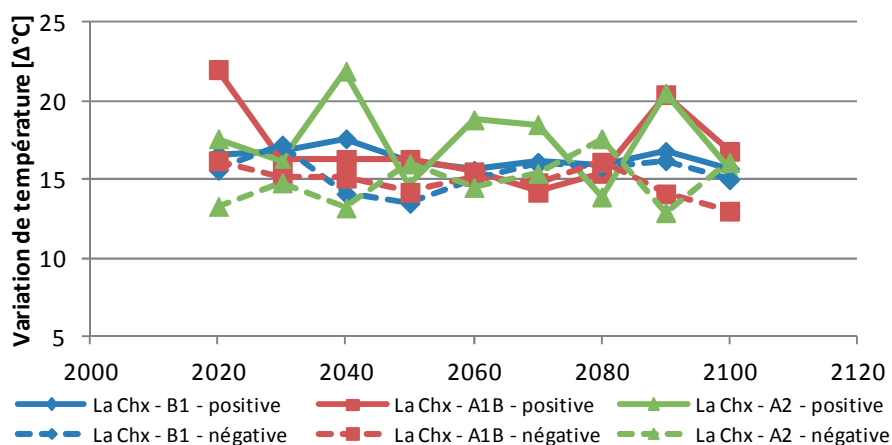


Fig. 5.47 – Variation maximale en 6h annuelle positive et négative des températures pour le site de La Chaux-de-Fonds et pour des conditions extrêmes selon les trois scénarios climatiques.

## 5.6. Cycles de gel-dégel

### 5.6.1. Nombre de cycles de gel-dégel

#### Définition

*Le nombre de cycles de gel-dégel correspond au nombre de journées en une année où la température maximale journalière de l'air mesurée à 2 m au-dessus du sol est supérieure à 0°C et la température minimale inférieure à 0°C.*

Le nombre de cycles de gel-dégel montre une tendance nette à la baisse jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués. La diminution dépend moyennement du scénario climatique, avec une diminution faible pour le scénario B1 et une diminution moyenne pour les scénarios A1B et A2 (Fig. 5.48).

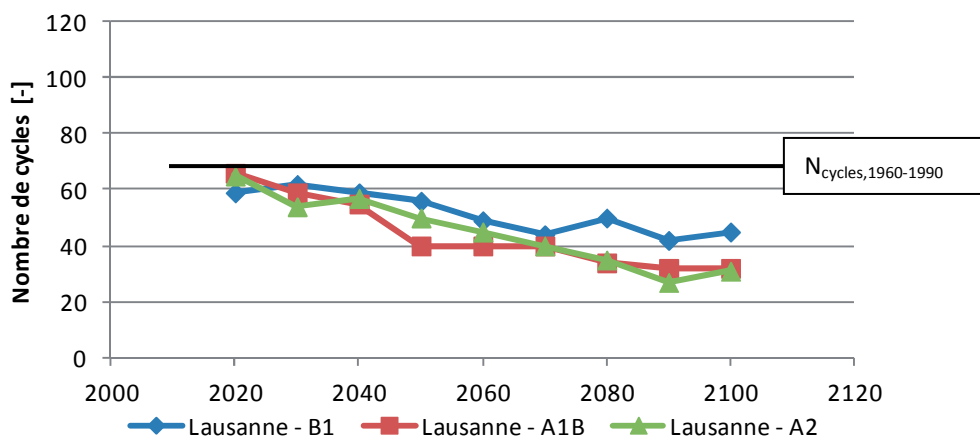


Fig. 5.48 – Nombre de cycles de gel-dégel pour le site de Lausanne selon les trois scénarios climatiques.

La diminution du nombre de cycles de gel-dégel dépend fortement du site géographique. Le site de Lugano présente la baisse la plus importante (jusqu'à -85% pour le scénario A1B), suivi des sites de Lausanne (-55%) et Altdorf (-50%). Les sites situés dans le Valais et dans le Jura présentent de leurs côtés des baisses moins importantes (Simplon : -20% pour le scénario A1B ; Sion : -30% ; La Chaux-de-Fonds : -35%). Le site de Lugano n'indique plus qu'une dizaine de cycles de gel-dégel pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (scénarios climatiques A1B et A2).

Les sites à altitude élevée (Simplon et La Chaux-de-Fonds) présentent en absolu le plus grand nombre de cycles de gel-dégel, suivi des sites de Sion, Coire et Berne. De l'autre côté, les sites Lausanne, Altdorf et Zurich et surtout le site de Lugano présentent le nombre absolu le plus faible (Fig. 5.49).

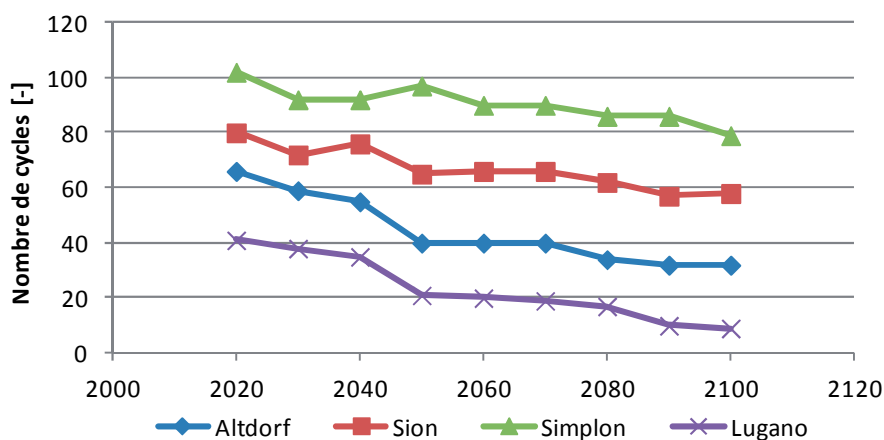


Fig. 5.49 – Nombre de cycles de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

## 5.6.2. Périodes de gel-dégel

### Définition

*Une période de gel-dégel correspond à une période où des cycles de gel-dégel se produisent pendant au moins 5 jours consécutifs.*

Le nombre de périodes de gel-dégel montre une tendance à la baisse pour la plupart des sites jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques (Fig. 5.50). Certains sites ne présentent aucune tendance nette (La Chaux-de-Fonds, Sion, Simplon, Coire). Le changement dépend moyennement du scénario climatique évalué, avec une diminution très faible pour le scénario B1 et une diminution moyenne pour les scénarios A1B et A2.

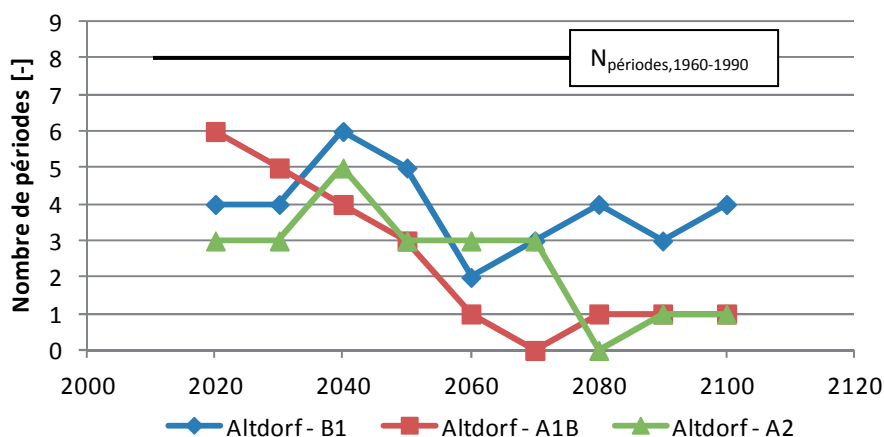


Fig. 5.50 – Nombre de périodes de gel-dégel pour le site de Altdorf selon les trois scénarios climatiques.

Les sites de Lugano, Lausanne et Altdorf vont voir disparaître les périodes de gel-dégel d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, alors que les sites de La Chaux-de-Fonds, Sion, Simplon et Coire vont voir leur nombre rester constant. La différence entre les différents sites géographiques est importante, aussi bien au niveau des tendances qu'au niveau du nombre absolu des périodes de gel-dégel. Par rapport au nombre de périodes, celui-ci est le plus élevé pour les sites du Simplon et de La Chaux-de-Fonds, et le plus faible pour les sites de Lugano et de Lausanne (Fig. 5.51).

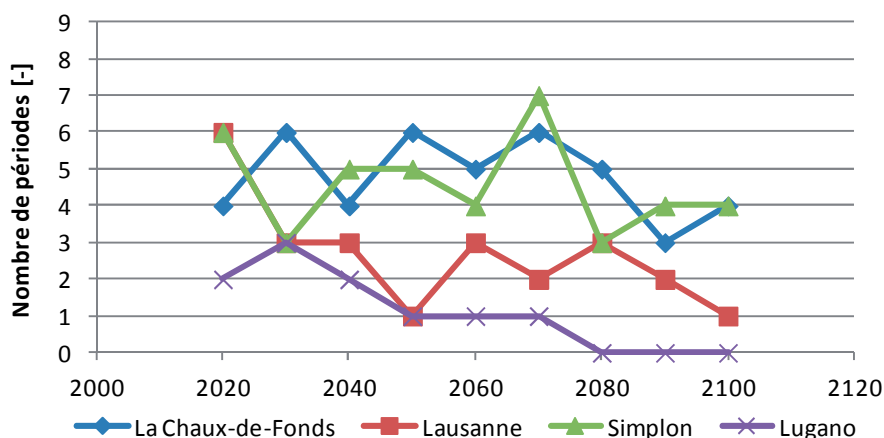


Fig. 5.51 – Nombre de périodes de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Par rapport à la durée moyenne des périodes de gel-dégel, certains sites indiquent une tendance à la baisse de la durée, alors que d'autres montrent aucune tendance nette jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.52). Etant donné le nombre absolu de périodes de gel-dégel assez faible il est difficile de prédire des tendances nettes pour ce paramètre.

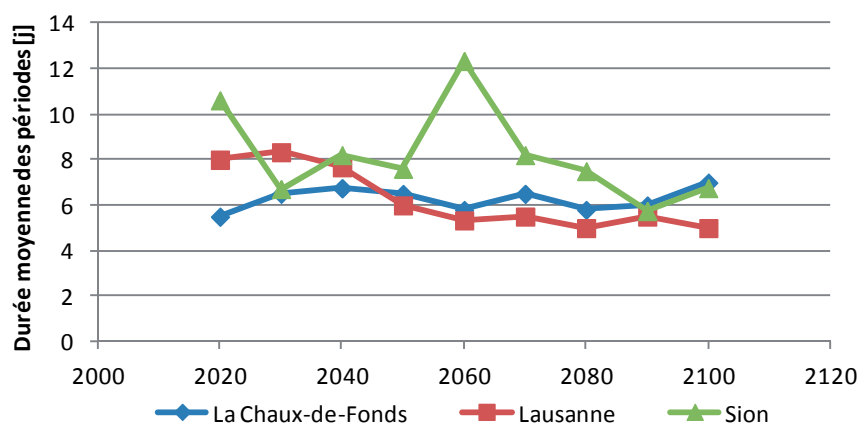


Fig. 5.52 – Durée moyenne des périodes de gel-dégel pour certains sites géographiques (scénario clim. A1B).

## 5.7. Précipitations

### 5.7.1. Précipitations moyennes (annuelles et saisonnières)

#### *Définition*

*Les précipitations moyennes correspondent à la moyenne des précipitations horaires pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Les précipitations moyennes montrent une très légère tendance à la baisse pour la moyenne annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.53). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site de Sion présente la moyenne la plus faible (environ 0.06 mm/an) et le site de Lugano la plus élevée (environ 0.17 mm/an). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

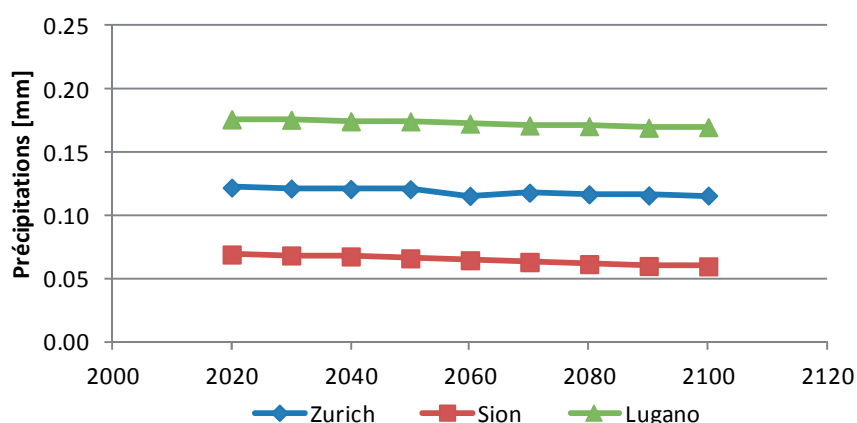


Fig. 5.53 – Précipitations moyennes annuelles pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Les précipitations moyennes ne montrent également que de très faibles tendances pour les moyennes saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Fig. 5.54). Ainsi les précipitations moyennes hivernales indiquent une faible tendance à l'augmentation et les précipitations moyennes estivales une faible tendance à la diminution. Les précipitations moyennes printanières et automnales indiquent les deux une très faible tendance à la diminution. Ces tendances se retrouvent pour tous les sites géographiques évalués. Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 et présentent aucune différence notable entre les trois scénarios climatiques.

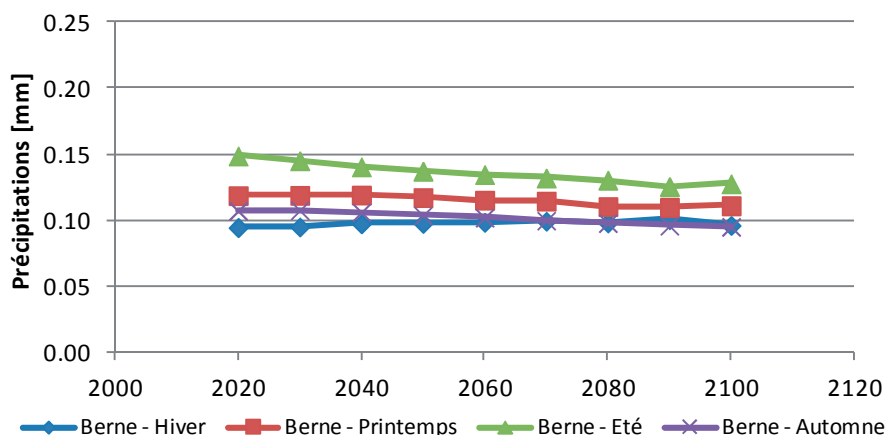


Fig. 5.54 – Précipitations moyennes saisonnières pour le site de Berne (scénario climatique A1B).

Des différences importantes existent entre les sites géographiques. En effet, certains sites présentent des précipitations hivernales plus abondantes (Sion, Simplon), alors que d'autres présentent des précipitations estivales plus abondantes (Berne, Zurich, Altdorf, Coire), et encore d'autres présentent des précipitations équilibrées entre les quatre saisons (La Chaux-de-Fonds, Lausanne). Le site de Lugano de son côté présente des précipitations hivernales particulièrement faibles et des précipitations importantes pour les trois autres saisons (Fig. 5.55).

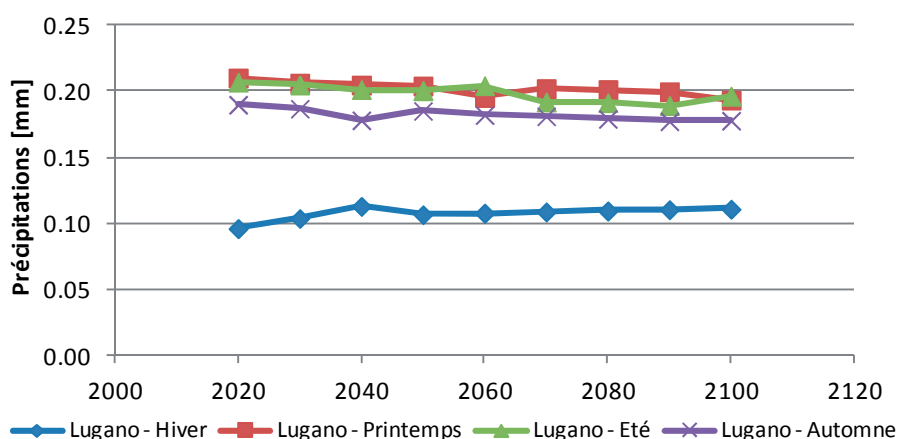


Fig. 5.55 – Précipitations moyennes saisonnières pour le site de Lugano (scénario climatique A1B).

### 5.7.2. Précipitations maximales (annuelles et saisonnières)

#### *Définition*

*Les précipitations maximales correspondent à la valeur maximale des précipitations horaires pendant une année complète/pendant une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Les précipitations maximales montrent une très légère tendance à la baisse pour la moyenne annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour la plupart des sites géographiques évalués (Fig. 5.56). Les sites de Sion et Simplon ne présentent aucune tendance nette. Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 pour tous les sites. Les sites de Sion et Coire présentent les valeurs maximales les plus faibles (entre 10 et 12 mm) et le site de Lugano la plus élevée (entre 22 et 28 mm). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

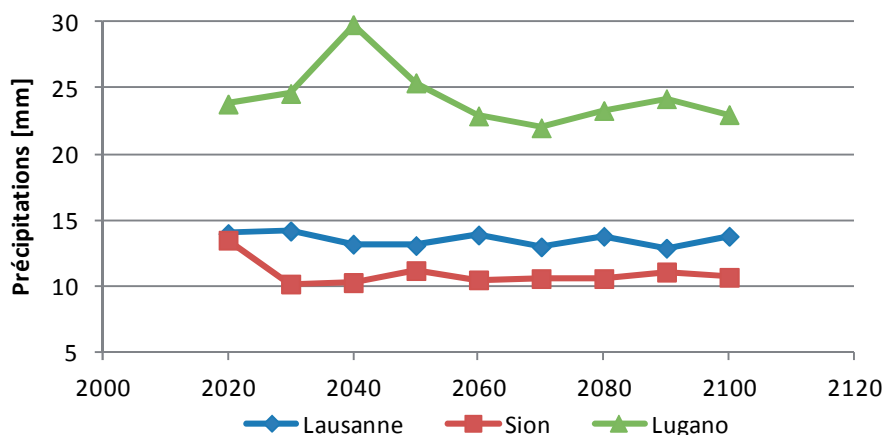


Fig. 5.56 – Précipitations maximales annuelles pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Si l'on s'intéresse à l'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans), des précipitations maximales annuelles très proches des précipitations avec des conditions standards sont prévues.

Les précipitations maximales ne montrent également que de très faibles tendances pour les moyennes saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Fig. 5.57). Ainsi les précipitations moyennes hivernales indiquent une faible tendance à l'augmentation et les précipitations moyennes estivales une faible tendance à la diminution. Les précipitations moyennes printanières et automnales indiquent les deux une très faible tendance à la diminution. Ces tendances se retrouvent pour tous les sites géographiques évalués. Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 et présentent aucune différence notable entre les trois scénarios climatiques.

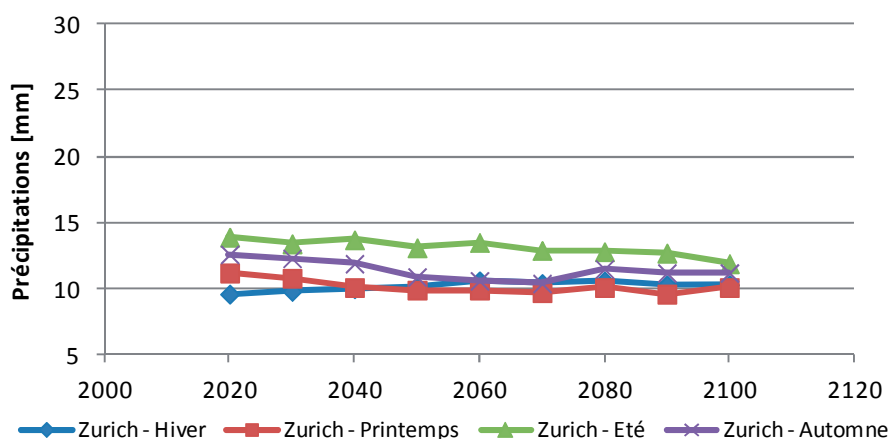


Fig. 5.57 – Précipitations maximales saisonnières pour le site de Zurich (scénario climatique A1B).

Des différences moyennes existent entre les sites géographiques. En effet, certains sites présentent des précipitations maximales plus élevées en hiver (Sion, Simplon), alors que d'autres présentent des précipitations maximales plus élevées en été (Lausanne, Berne, Zurich, Altdorf, Coire), et encore d'autres présentent des précipitations maximales équilibrées entre les quatre saisons (La Chaux-de-Fonds). Le site de Lugano de son côté présente des précipitations maximales faibles en hiver et des précipitations maximales importantes pour les trois autres saisons.

### 5.7.3. Précipitations maximales sur 24h (annuelles et saisonnières)

#### Définition

*Les précipitations maximales sur 24h correspondent à la valeur maximale de la somme des précipitations horaires tombées en 24h pour une année complète/pour une saison complète (hiver, printemps, été, automne).*

Les précipitations maximales en 24h montrent une très légère tendance à la baisse pour la moyenne annuelle jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour la plupart des sites géographiques évalués (Fig. 5.58). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 pour tous les sites. Les sites de Sion et Coire présentent les valeurs maximales les plus faibles (entre 30 et 40 mm) et le site de Lugano la plus élevée (entre 70 et 80 mm). Le site de Lugano présente des précipitations maximales sur 24h particulièrement élevée. Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

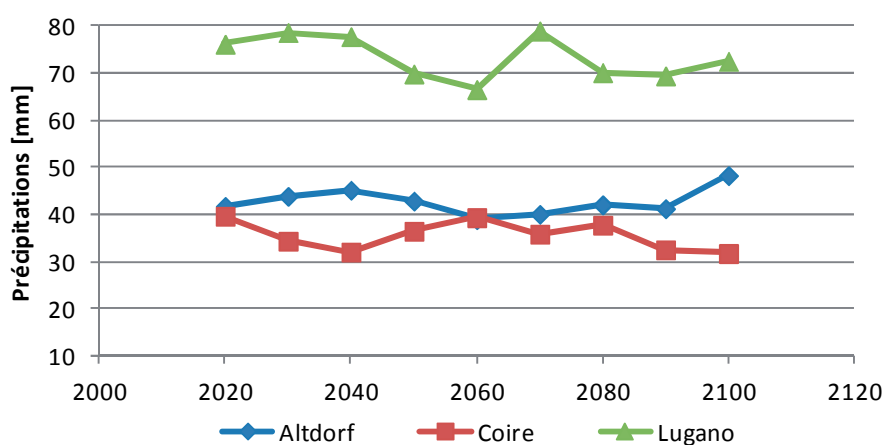


Fig. 5.58 – Précipitations maximales sur 24h annuelles pour certains sites géographiques (scénario clim. A1B).

Les précipitations maximales ne montrent également que de très faibles tendances pour les moyennes saisonnières jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Fig. 5.59). Ainsi les précipitations moyennes hivernales indiquent une faible tendance à l'augmentation et les précipitations moyennes estivales une faible tendance à la diminution. Les précipitations moyennes printanières et automnales indiquent les deux une très faible tendance à la diminution. Ces tendances se retrouvent pour tous les sites géographiques évalués. Les valeurs restent également très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990 et présentent aucune différence notable entre les trois scénarios climatiques.

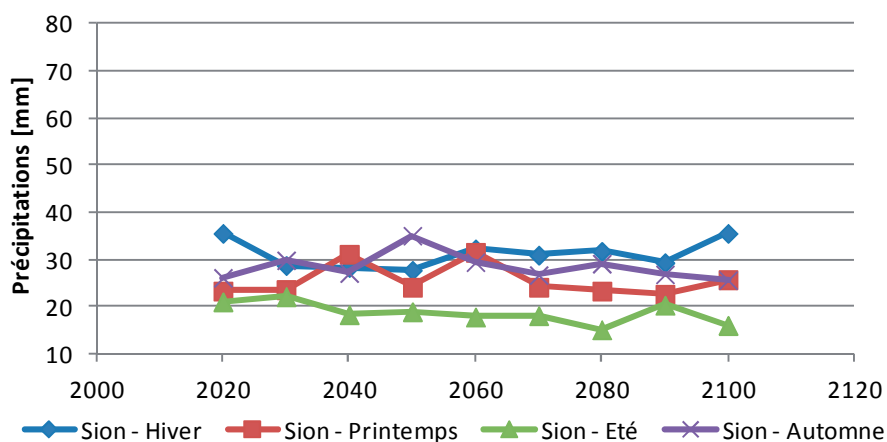


Fig. 5.59 – Précipitations maximales sur 24h saisonnières pour le site de Sion (scénario climatique A1B).

Des différences moyennes existent entre les sites géographiques. En effet, certains sites présentent des précipitations maximales plus élevées en hiver (Sion), alors que d'autres présentent des précipitations maximales plus élevées en été (Berne, Zurich, Altdorf, Coire), et encore d'autres présentent des précipitations maximales équilibrées entre les quatre saisons (La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Simplon). Le site de Lugano de son côté présente des précipitations maximales faibles en hiver et des précipitations maximales importantes pour les trois autres saisons.

#### 5.7.4. Périodes sèches (courtes et longues)

##### Définition

*Une période sèche correspond à une période où les précipitations journalières sont inférieures à 1 mm pendant au moins 5 jours (période courte)/10 jours (période longue) consécutifs.*

Les nombres de périodes sèches courtes et longues ne montrent aucune tendance nette jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.60). Les nombres restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Les sites de Sion, du Simplon, de Coire et de Lugano présentent le plus de périodes sèches courtes (entre 20 et 30) et le site de La Chaux-de-Fonds le moins (entre 10 et 15). Par rapport aux périodes sèches longues, les sites de Sion et de Lugano présentent le plus de telles périodes (entre 5 et 10 périodes) et le site de La Chaux-de-Fonds le moins (entre 0 et 3). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques pour les périodes sèches courtes et longues.

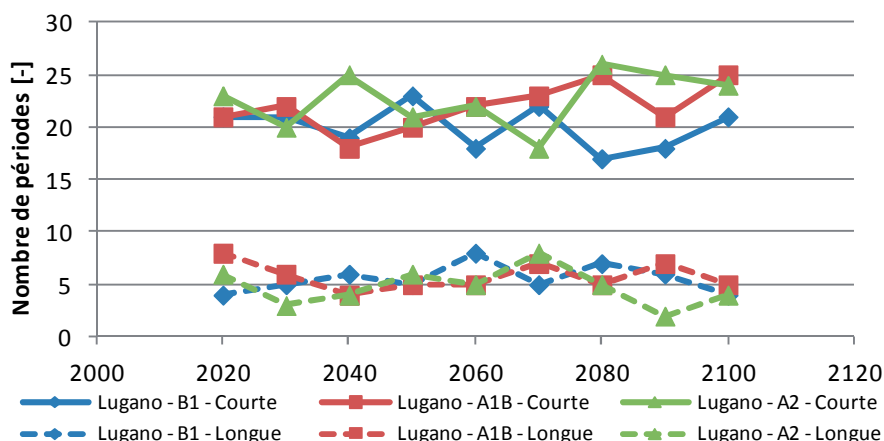


Fig. 5.60 – Nombre de périodes sèches courtes et longues pour le site de Lugano selon les trois scénarios climatiques.

Par rapport à la répartition des périodes sèches courtes et longues entre les saisons, aucune tendance uniforme jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle n'est décelable, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.61). Néanmoins plusieurs sites présentent une légère diminution du nombre de périodes sèches estivales.



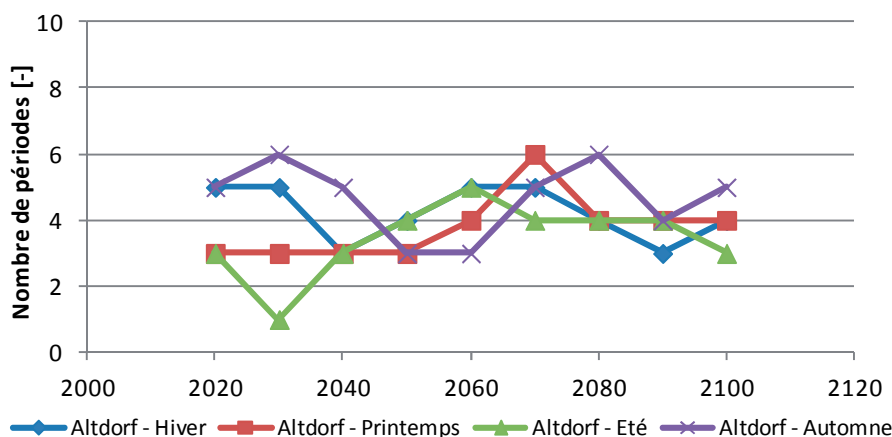


Fig. 5.61 – Nombre de périodes sèches courtes par saison pour le site de Altdorf (scénario climatique A1B)

### 5.7.5. Hauteur de neige moyenne (hivernale et mensuelle)

#### Définition

*La hauteur de neige moyenne correspond à la moyenne de la hauteur de neige horaire pendant un hiver complet (octobre à avril)/pendant un mois complet.*

La hauteur de neige moyenne montre une tendance à la diminution de la hauteur moyenne hivernale jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.62). Certains sites présentent des diminutions plus importantes (La Chaux-de-Fonds, Simplon), alors que les autres sites présentent des diminutions plus faibles. Les valeurs sont en général plus basses que les valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site du Simplon présente les hauteurs moyennes les plus élevées (entre 20 et 120 mm) et le site de Lugano les plus faibles (entre 0 et 2 mm). La dispersion des valeurs d'une décennie à une autre peut être très importante. Il n'existe que très peu de différences entre les trois scénarios climatiques.

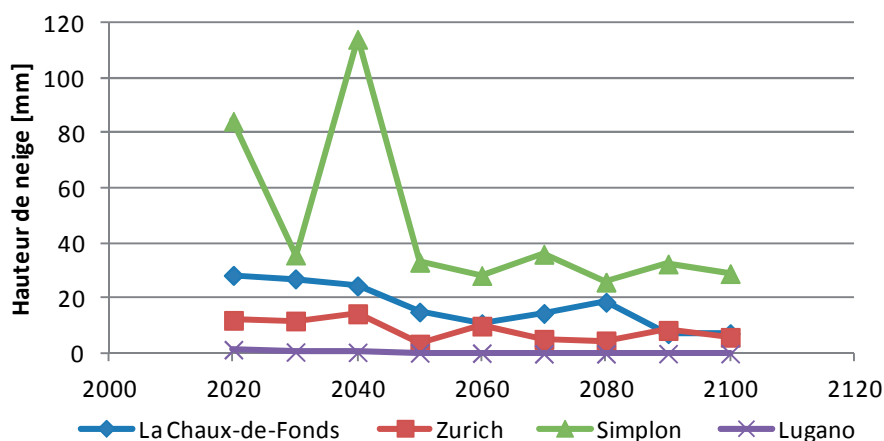


Fig. 5.62 – Hauteur de neige moyenne hivernale pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Les hauteurs de neige moyennes ne montrent aucune tendance nette pour les moyennes mensuelles jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Il peut aussi bien exister des augmentations que des diminutions des hauteurs moyennes pendant les mois hivernales (octobre à avril).

### 5.7.6. Hauteur de neige maximale (hivernale et mensuelle)

#### Définition

*La hauteur de neige maximale correspond à la valeur maximale de la hauteur de neige horaire pendant un hiver complet (octobre à avril)/pendant un mois complet.*

La hauteur de neige maximale ne montre aucune tendance uniforme de la hauteur maximale hivernale jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.63). En effet, pour certains sites une diminution de la hauteur maximale peut être observée (La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Altdorf, Simplon, Lugano), alors que pour d'autres la hauteur maximale demeure constante (Berne, Zurich, Sion, Coire) ou augmente même pour certains cas (p.ex. Berne et Coire pour le scénario climatique A2). Les sites de La Chaux-de-Fonds, de Altdorf et du Simplon présentent des diminutions plus importantes que les autres sites. Les valeurs sont en général plus basses que les valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site du Simplon présente les hauteurs maximales les plus élevées (entre 200 et 800 mm) et le site de Lugano les plus faibles (entre 0 et 150 mm). La dispersion des valeurs d'une décennie à une autre peut être très importante. Il peut exister des différences importantes, mais non uniformes, entre les trois scénarios climatiques.

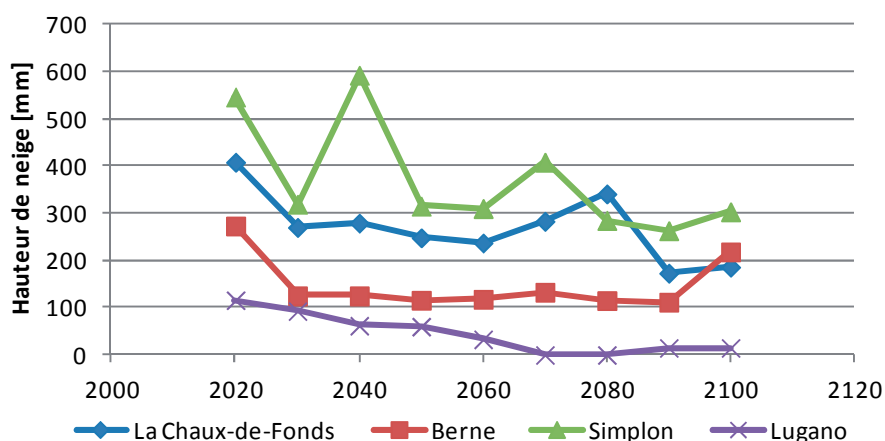


Fig. 5.63 – Hauteur de neige maximale hivernale pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

Les hauteurs de neige maximales ne montrent aucune tendance nette pour les valeurs maximales mensuelles jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Il peut aussi bien exister des augmentations que des diminutions des hauteurs maximales pendant les mois hivernales (octobre à avril).

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des valeurs de hauteurs de neige maximales très proches par rapport aux valeurs avec des conditions standards.

## 5.8. Vent

### 5.8.1. Vitesse moyenne annuelle

#### Définition

*La vitesse moyenne annuelle du vent correspond à la moyenne des vitesses de vent horaires pendant une année complète.*

La vitesse moyenne annuelle du vent ne montre aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.64). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site de Lausanne présente la moyenne la plus faible (environ 1.2 m/s) et le site de La Chaux-de-Fonds la plus élevée (environ 3.5 m/s). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

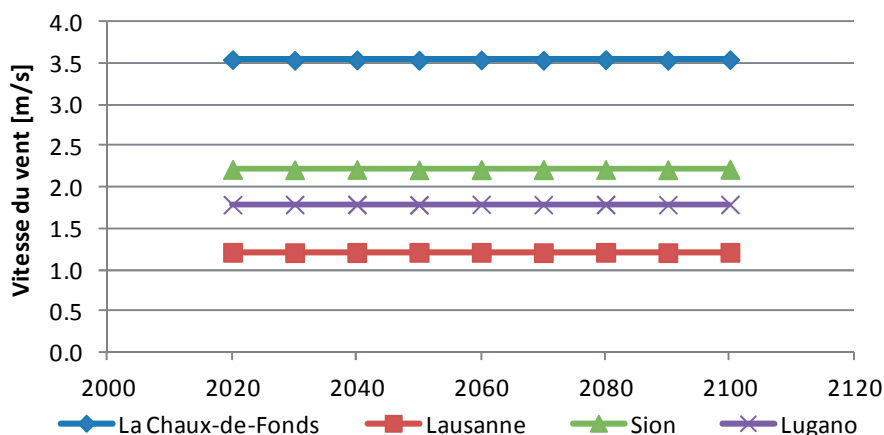


Fig. 5.64 – Vitesse moyenne annuelle du vent pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

### 5.8.2. Vitesse maximale annuelle

#### *Définition*

*La vitesse maximale annuelle du vent correspond à la valeur maximale des vitesses de vent horaires pendant une année complète.*

La vitesse maximale annuelle du vent ne montre également aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.65). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site de Lausanne présente la vitesse maximale la plus faible (environ 10.2 m/s) et le site de Zurich la plus élevée (environ 16.7 m/s). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

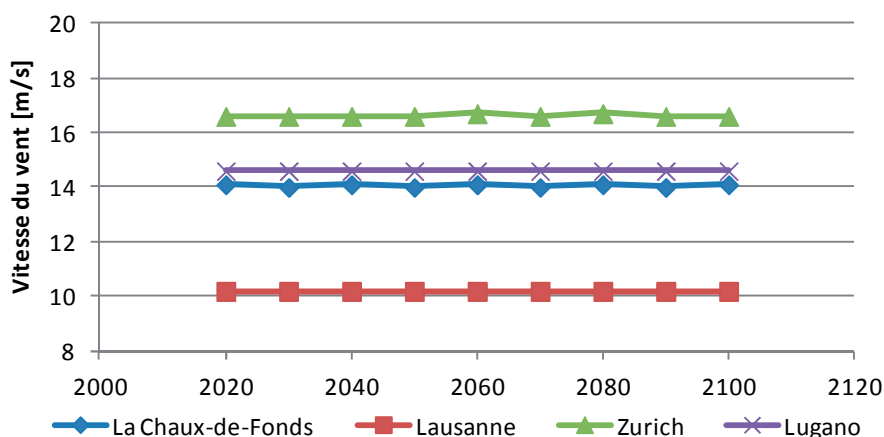


Fig. 5.65 – Vitesse maximale annuelle du vent pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des valeurs de vitesses du vent moyennes et maximales très proches par rapport aux valeurs avec des conditions standards.

## 5.9. Conditions atmosphériques

### 5.9.1. Ensoleillement moyen journalier

#### Définition

*L'ensoleillement moyen journalier correspond à la valeur moyenne des ensoleillements journaliers pendant une année complète.*

L'ensoleillement moyen journalier ne montre aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.66). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site de Zurich présente la moyenne la plus faible (environ 10.2 min par jour) et le site de Sion la plus élevée (environ 15.4 min par jour). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

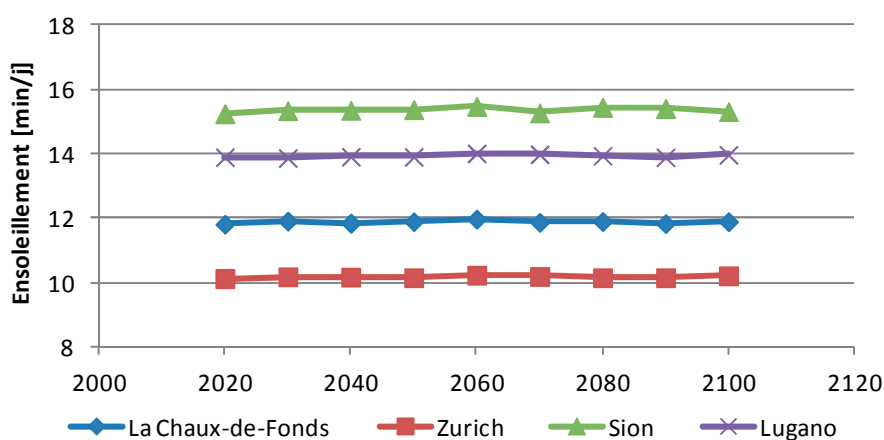


Fig. 5.66 – Ensoleillement moyen journalier pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

### 5.9.2. Ensoleillement maximal journalier

#### Définition

*L'ensoleillement maximal journalier correspond à la valeur maximale des ensoleillements journaliers pendant une année complète.*

L'ensoleillement maximal journalier ne montre aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.67). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Le site de Zurich présente l'ensoleillement maximal journalier le plus faible (environ 244 min par jour) et le site de Sion le plus élevé (environ 370 min par jour). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

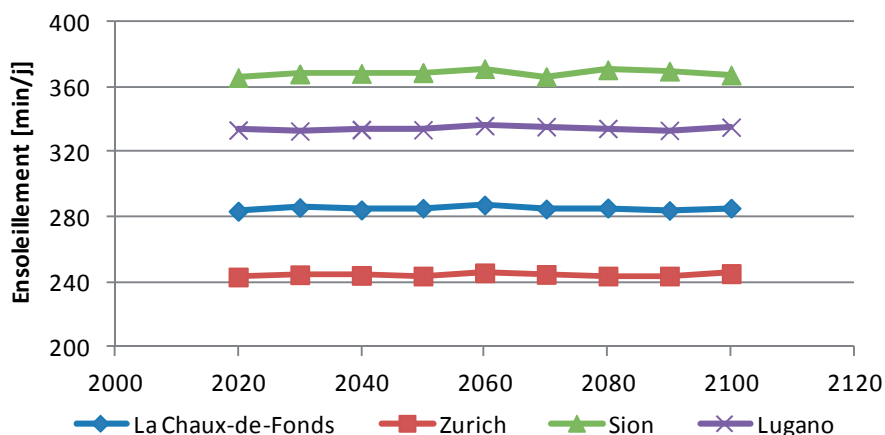


Fig. 5.67 – Ensoleillement maximal journalier pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

L'analyse des années avec des conditions extrêmes (extrême sur 10 ans) indique des valeurs d'ensoleillement moyen et maximal très proches par rapport aux valeurs avec des conditions standards.

## 5.10. Humidité relative

### 5.10.1. Humidité relative moyenne annuelle

#### Définition

*L'humidité relative moyenne annuelle correspond à la moyenne des valeurs d'humidités journalières pendant une année complète.*

L'humidité relative moyenne annuelle ne montre aucune tendance jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour les trois scénarios climatiques et pour tous les sites géographiques évalués (Fig. 5.68). Les valeurs restent très proches par rapport aux valeurs de la période de référence 1960-1990. Les sites du Simplon, de Coire et de Lugano présentent les moyennes les plus faibles (entre 70 et 72%) et les sites de Berne et Zurich les plus élevées (entre 77 et 79%). Il n'existe aucune différence importante entre les trois scénarios climatiques.

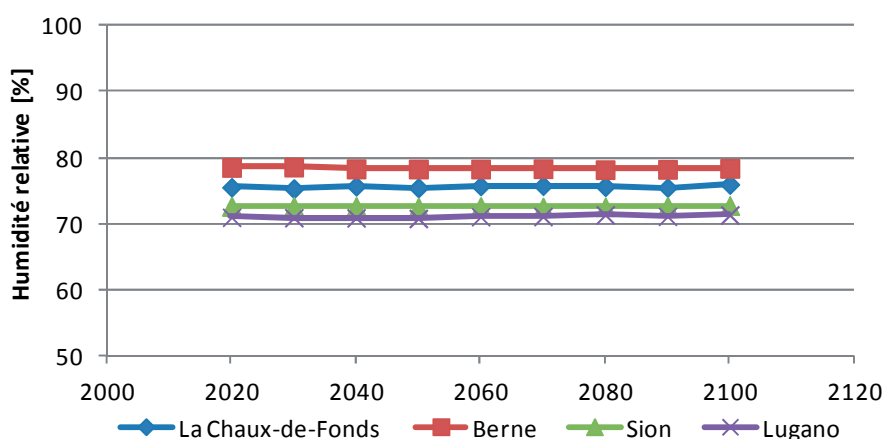


Fig. 5.68 – Humidité relative moyenne annuelle pour certains sites géographiques (scénario climatique A1B).

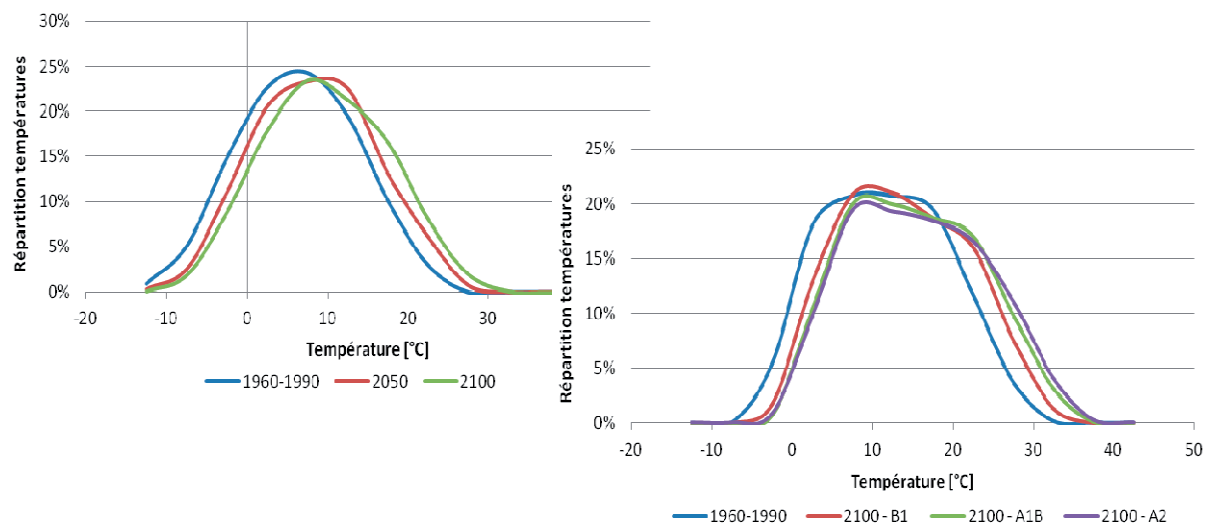
## 5.11. Aperçu des principaux changements des conditions météorologiques et impacts sur les infrastructures routières

L'évaluation des prévisions météorologiques a montré que des changements importants des conditions météorologiques sont envisageables d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et ceci aussi bien pour toutes les régions climatiques suisses. Les principaux changements des conditions météorologiques "routières" qui sont prévus sont résumés dans les sections suivantes (Chapitres 5.11.1 à 5.11.3).

### 5.11.1. Températures

Au cours du 21<sup>ème</sup> siècle toutes les régions climatiques de la Suisse vont être sujettes à un changement de leurs régimes de températures. Ce changement est déjà actuellement en cours et va s'intensifier tout au long de ce siècle. L'intensité du changement est clairement dépendante du scénario d'émission prise en considération, donc de l'évolution démographique, sociale, économique et technologique de l'humanité.

Le changement des régimes de températures peut être expliqué par l'évolution des courbes de répartition des températures (Fig. 5.69). En effet, les courbes indiquent pour tous les sites géographiques aussi bien un décalage et un étalement des températures. Ceci implique une augmentation des températures moyennes mais également une apparition plus fréquente des températures extrêmes (hautes et basses). Par exemple en été, un décalage plus important des températures est prévue l'après-midi et le soir et un décalage plus faible la nuit et le matin. Les différents scénarios climatiques peuvent en outre accentuer ces changements. De manière générale les scénarios A1B et A2 montrent des changements assez proche, alors que le scénario B1 indique des changements toujours inférieurs aux deux autres scénarios.



**Fig. 5.69** – Courbes de répartition des températures moyennes pour le site de La Chaux-de-Fonds selon le scénario climatique A1B (gauche) et pour le site de Lugano pour les trois scénarios climatiques (droite).

Le changement des températures va toucher toutes les régions climatiques, mais peut présenter des différences régionales non négligeables. De manière générale, l'on va assister à une augmentation des températures moyennes, maximales et minimales avec des augmentations légèrement plus marquées des températures estivales par rapport aux températures hivernales. Ceci implique une augmentation de la variation annuelle des températures. Les changements de températures sont très proches entre les différentes régions climatiques, mais en valeurs relatives ceci implique des changements plus importants pour les régions plus "froides" de la Suisse.

Le changement des régimes de températures va également avoir un impact direct sur l'apparition de périodes chaudes et froides. En effet les journées et périodes chaudes vont clairement augmenter au fil du 21<sup>ème</sup> siècle, alors que les journées et périodes froides vont diminuer. L'augmentation des journées et périodes chaudes dans les régions à altitude élevée va davantage correspondre à une apparition de ces journées/périodes. En effet, dans ces régions les journées/périodes chaudes étaient encore inexistantes pour la période de référence (1960-1990). Pour les autres sites l'augmentation du nombre de périodes chaudes sera accompagnée par une augmentation de leurs durées moyennes.

La diminution des journées et périodes froides dans les régions plus "chaudes" de la Suisse va davantage correspondre à une quasi-disparition de ces journées/périodes. En effet, dans ces régions le nombre de journées/périodes froides étaient encore existantes pour la période de référence (1960-1990), mais va tendre vers zéro d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Pour les autres sites la diminution du nombre de périodes froides sera accompagnée par une légère diminution de leurs durées moyennes.

Le changement des régimes de températures ne semble avoir que très peu d'impact sur les variations horaires et journalières des températures annuelles et saisonnières quelque soit le site géographique ou le scénario climatique évalué. Par contre un changement des cycles de gel-dégel est prévu. En effet, ces derniers vont diminuer en nombre absolu pour tous les sites géographiques et en même temps les périodes de gel-dégel vont décroître.

Les années avec des conditions extrêmes vont avoir un impact considérable sur les températures maximales. Ainsi des températures estivales autour de 40°C sont prévues pour plusieurs sites géographiques situés plutôt au sud de la Suisse (Bassin lémanique, Valais, Grisons et Tessin).

### **5.11.2. Précipitations**

Les régimes de précipitations vont également être sujets à des changements au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour toutes les régions climatiques de la Suisse. Ces changements seront par contre moins marqués que les changements prévus des régimes de températures (Chapitre 5.11.1). Pour les régimes de précipitations, l'intensité des changements est très peu dépendante du scénario d'émission prise en considération.

De manière générale, une diminution des précipitations moyennes et maximales annuelles est prévue, ainsi qu'une diminution des précipitations moyennes et maximales entre le printemps et l'automne. Par contre une légère augmentation des précipitations moyennes et maximales hivernales est prévue. Ces changements vont toucher toutes les régions de manière uniforme et sont indépendants du scénario climatique évalué. En effet, les différences entre les trois scénarios climatiques analysés sont négligeables pour l'évolution de ces paramètres.

Le changement des régimes de précipitations va également avoir un faible impact sur l'apparition de périodes sèches. En effet celles-ci vont plutôt rester constantes au fil du 21<sup>ème</sup> siècle en ce qui concerne leur nombre annuel, par contre une faible augmentation du nombre de périodes sèches estivales peut être prévue pour plusieurs régions climatiques.

Par rapport aux précipitations neigeuses, une diminution de la hauteur de neige moyenne est prévue, quelque soit le site géographique ou le scénario climatique évalué. Cette diminution va davantage toucher les régions à altitude élevée, alors que dans la région du Sud des Alpes les hauteurs moyennes vont s'approcher du zéro pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Les hauteurs de neige maximales montrent une diminution de leurs intensités pour plusieurs régions, mais pour d'autres régions des valeurs constantes, voire en augmentation, sont également possibles.

Les années avec des conditions extrêmes vont avoir peu d'impact sur les précipitations moyennes ou maximales.

### **5.11.3. Autres conditions**

Les autres conditions météorologiques (vent, humidité, ensoleillement) ne montrent aucune tendance nette de changement de leurs intensités au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour toutes les régions climatiques de la Suisse et les trois scénarios climatiques évalués.

De manière générale, les vitesses de vent moyennes et maximales, l'ensoleillement moyen et maximal journalier et l'humidité relative moyenne annuelle ne devraient pas être sujets à des changements importants d'ici 2100. Ceci est valable aussi bien pour les années avec des conditions standard que pour les années avec des conditions extrêmes.



## 6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ÉTAT STRUCTUREL ET FONCTIONNEL DES CHAUSSÉES

Le changement climatique peut avoir un impact important sur l'état structurel et fonctionnel d'une chaussée. Dans les chapitres à suivre, les dégradations principales, touchées par un changement des conditions climatiques, sont décrites (Chapitre 6.1) et la problématique plus spécifique de l'orniérage est traitée en détail en s'intéressant à différents modèles de comportement des revêtements bitumineux (Chapitre 6.2). Finalement, l'impact du changement climatique sur l'état structurel et fonctionnel des chaussées est évalué en profondeur à l'aide de deux méthodes de dimensionnement : La méthode de dimensionnement au gel suisse (Chapitre 6.3) et une méthode de dimensionnement mécanistique-empirique (Chapitre 6.4). Pour les deux méthodes les changements des conditions météorologiques évaluées dans le chapitre précédent (Chapitre 5) ont été appliqués.

### 6.1. Etat structurel et état fonctionnel des chaussées

L'état structurel et fonctionnel d'une chaussée permet de déterminer l'état général d'une route. L'état structurel décrit le comportement mécanique d'une chaussée, alors que l'état fonctionnel décrit l'état de la qualité de service qu'une chaussée offre aux usagers. L'état de la chaussée à un moment donné est décrit par les dégradations subies de la chaussée et par ses performances actuelles. Il existe de nombreuses manières de décrire l'état structurel et fonctionnel d'une chaussée à travers la mesure de différentes caractéristiques d'état. Selon la norme suisse SN 640 925b [135] sur la gestion de l'entretien des chaussées, cinq caractéristiques d'état, décrites par les indices d'état  $I_1$  à  $I_5$ , peuvent être déterminées pour une chaussée (Fig. 6.1). Ces caractéristiques permettant de donner des indications sur l'état de dégradation d'une chaussée et sur sa durée de vie résiduelle.

| Zustandsmerkmale<br><i>Caractéristiques d'état</i>         | Zustandsindizes<br><i>Indices d'état</i> |
|--|--|
| Oberflächenschäden<br><i>Dégradations de surface</i>       | $I_0, I_1$                               |
| Ebenheit in Längsrichtung<br><i>Planéité longitudinale</i> | $I_2$                                    |
| Ebenheit in Querrichtung<br><i>Planéité transversale</i>   | $I_3$                                    |
| Griffigkeit<br><i>Qualité antidérapante</i>                | $I_4$                                    |
| Tragfähigkeit<br><i>Portance</i>                           | $I_5$                                    |

Fig. 6.1 – Caractéristiques d'état et indices d'état [135].

Les indices d'état de dégradations de surface ( $I_0$  sans phénomène d'orniérage ;  $I_1$  avec phénomène d'orniérage) comprennent des dégradations du revêtement, des déformations du revêtement, des dégradations structurelles, le phénomène de surface glissante et les réparations. Les indices d'état  $I_2$  à  $I_5$  de leur côté décrivent un paramètre unique.

Les conditions météorologiques que les chaussées supportent tout au long de leurs durées de vie ont un impact prépondérant sur leurs caractéristiques d'état et les éventuelles dégradations subies. Dans le cadre de cette thèse, trois types de dégradations principales sont intégrées pour l'analyse de durée de vie d'une chaussée et sur l'impact du changement climatique sur ses dégradations :

- Orniérage – Planéité transversale (Chapitre 6.1.1).
- Fissuration (Chapitre 6.1.2).
- Caractéristiques de surface (Chapitre 6.1.3).

### 6.1.1. Orniérage

#### 6.1.1.1. Description du phénomène d'orniérage

Le phénomène d'orniérage correspond à l'un des principaux mécanismes de dégradation des chaussées souples. Il se manifeste par un enfoncement de la superstructure dans la trace des roues et la formation de renflements le long du bord de la trace (bourrelets). Il s'agit en fait d'une déformation permanente des revêtements, qui peut s'étendre à différentes profondeurs. Souvent, l'on distingue entre l'orniérage ne touchant que les couches supérieures et l'orniérage touchant les couches de fondations. Les causes probables de ce phénomène sont [12][136] :

- Le fluage de l'enrobé dans les couches supérieures du fait d'une formulation inadaptée, d'une forte compacité, ou d'un liant trop mou. Ce phénomène est accentué par des températures élevées et un fort ensoleillement et se produit donc principalement lors des périodes chaudes.
- La déformation verticale des couches de fondation et/ou du sol dû à un sous-dimensionnement des couches inférieures. Ce phénomène peut être accentué par des cycles de gel-dégel répétés ou par l'action des précipitations lorsque la chaussée est fissurée.

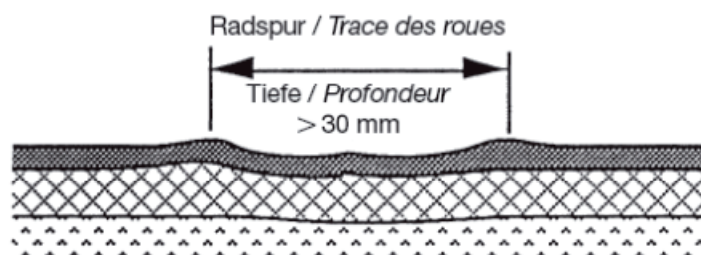


Fig. 6.2 – Schéma du phénomène d'orniérage [136].

La formation et la propagation de l'orniérage peut avoir dans un premier temps des effets directs sur la sécurité des usagers (accumulation d'eau dans les ornières, formation de bourrelets, effet de "canalisation" du trafic, etc.), puis par la suite avoir un impact sur les performances structurelles (dégradation des fondations, fissuration au bord des ornières, apparition de nids de poule, etc.) [12][136].

Les paramètres intervenant dans le phénomène d'orniérage sont d'une part le trafic (% poids lourds, charges, vitesse, type d'essieux, etc.) et les conditions météorologiques (températures, ensoleillement, gel-dégel, etc.) et d'autre part les caractéristiques des couches mises en place (épaisseurs couches, teneur en liant, granulométrie, etc.) et les paramètres liés à la géométrie de la route (profil en long, déclivité, etc.). Concernant les matériaux, un bitume trop mou, des matériaux roulés ou semi-concassés, trop de sable et un dosage en liant trop élevé impliquent une mauvaise résistance à l'orniérage. Les enrobés présentant une bonne résistance ont généralement un dosage en liant (rigide) faible, une teneur en vides élevée et un grand angle de frottement interne [11][26].

En Suisse, les chaussées sont principalement touchées par l'orniérage des couches supérieures. L'orniérage peut se former sur des périodes très courtes lors de journées très chaudes présentant un trafic élevé de poids lourds.

#### 6.1.1.2. L'orniérage en tant que caractéristique d'état

L'orniérage est une caractéristique clé pour décrire l'état d'une chaussée souple. Dans la plupart des pays, l'orniérage intervient dans la gestion de l'entretien des chaussées sous forme d'indice (p.ex. facteur RD (rut depth) pour les essais AASHO de la "American Association of State Highway and Transportation Officials") [12].

En Suisse, selon la norme SN 640 925b (2003) [135], l'orniérage est décrit par l'indice  $I_3$  (caractéristique d'état de la planéité transversale) et l'indice  $I_1$  (caractéristique de dégradation de surface). L'indice de dégradation de surface ( $I_1$ ) caractérise l'ensemble des dégradations de surface en y incluant la profondeur d'ornière évaluée visuellement. L'indice de planéité transversale ( $I_3$ ) caractérise la planéité transversale qui dépend uniquement de l'orniérage. L'orniérage est décrit par deux facteurs (Fig. 6.3) [135] :

- Profondeur des flaches ou d'ornières  $T$  : Profondeur des ornières mesurée par rapport à une droite reliant les points les plus élevés d'une chaussée sur une longueur de 4 m.
- Profondeur des flaches par rapport à l'horizontale ou hauteur d'eau théorique  $t$  : Profondeur des ornières par rapport à l'horizontale.

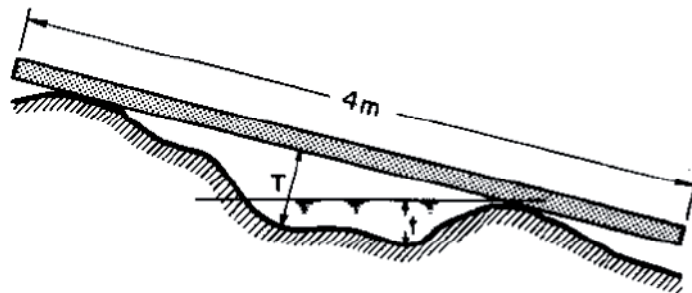


Fig. 6.3 – Profondeur d'ornières  $T$  et hauteur d'eau théorique  $t$  [125].

Ces deux facteurs peuvent être relevés de manière manuellement (latte à mesurer) ou avec des appareils d'auscultation munis d'un profilographe. Lors du relevé d'un tronçon de route, des profils transversaux tous les 50 m sont habituellement effectués [125].

La profondeur d'ornières  $T$  intervient dans l'indice de dégradation de surface  $I_1$  selon trois niveaux de gravités de la dégradation [136] :

- Gravité faible (niveau  $S=1$ ) : La dégradation est perceptible ; la profondeur  $T$  sous la latte est inférieure à 15 mm.
- Gravité moyenne (niveau  $S=2$ ) : La dégradation est nettement perceptible ; une éventuelle fissuration longitudinale se forme ; la profondeur  $T$  se situe entre 15 et 30 mm.
- Gravité élevée (niveau  $S=3$ ) : La dégradation est marquée ; de nombreuses fissures longitudinales ou un faïençage se forme ; l'empreinte de roues jumelées est visible ; la profondeur  $T$  est supérieure ou égale à 30 mm.

Concernant l'indice de la planéité transversale  $I_3$ , la profondeur d'ornières  $T$  peut être directement transformée en valeur d'indice à l'aide d'un abaque selon la norme SN 640 925b (2003) [135]. L'indice permet par la suite de juger de l'état de la chaussée selon le type de route évalué (Fig. 6.4).

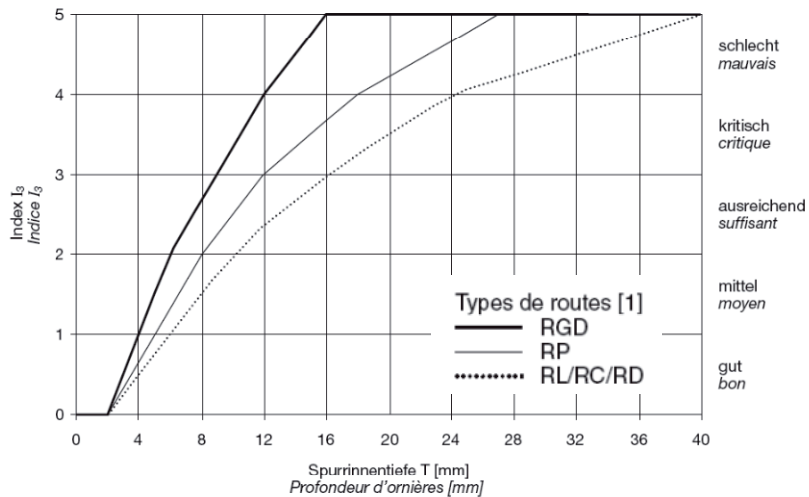


Fig. 6.4 – Transformation de la profondeur d'ornières T en valeur d'indice  $I_3$  [135].

La hauteur d'eau théorique  $t$  n'est pas transformée en indice, mais est évaluée du point de vue de la sécurité des usagers. Les valeurs indicatives suivantes sont à respecter en Suisse [135] :

- Pour les autoroutes et routes avec vitesse autorisée supérieure à 80 km/h :  $t_{\max} = 4.0$  mm.
- Pour les autres routes :  $t_{\max} = 8.0$  mm.

Lors de la réception d'une nouvelle chaussée des valeurs limites de réception de la profondeur d'ornières T sont à respecter [126] :

- Pour les autoroutes :  $T_{\max} = 4.0$  mm.
- Pour les routes principales :  $T_{\max} = 5.0$  mm.
- Pour les autres routes :  $T_{\max} = 6.0$  mm.

### 6.1.1.3. Modèles de comportement

Il existe beaucoup de relations et de modèle de comportement permettant de prédire la formation et le développement des ornières. Il faut distinguer entre le phénomène d'orniérage en surface (fluage des couches supérieures) et l'orniérage au niveau des couches inférieures (enfouissement des couches) [10].

Les modèles existants se basent soit sur des lois théoriques de comportement des matériaux (modèles analytiques), soit sur des résultats d'observations faites sur les chaussées routières ou des planches d'essais (modèles empiriques) ou alors sur une interaction entre les deux modèles (modèles analytiques-empiriques). La représentation de l'évolution générale du phénomène d'orniérage est souvent transformée en loi d'évolution d'un indice d'état de l'orniérage [9].

## 6.1.2. Fissuration

### 6.1.2.1. Description du phénomène de fissuration

Le phénomène de fissuration correspond à l'un des principaux mécanismes de dégradation des chaussées souples. Il existe différents types de fissuration qui se manifestent selon différents mécanismes de dégradations des chaussées. Les fissurations principales sont :

- Fissuration thermique : Fissuration depuis la surface due aux cycles de températures, aux basses températures, aux cycles gel-dégel, etc.
- Fissuration par fatigue : Fissuration par le bas de la couche de base due à la fatigue mécanique (traction engendrée par les charges de trafic).

Plusieurs autres types de fissuration existent, tels que les fissures dues à des affaissements de bords, à des problèmes de joints longitudinaux ou de ponts, à une mauvaise continuité entre un revêtement existant et une réparation, etc. Si des dégradations importantes existent, les fissures peuvent se propager dans la couche bitumineuse entière et rejoindre la surface depuis le bas, ou la couche de base depuis la surface.

La formation et la propagation de fissures a des effets directs sur les performances structurelles d'une chaussée (diminution de la portance, apparition de nids de poule, etc.), mais peut également avoir un impact sur la sécurité des usagers (apparition de pelades ou nids de poule suite à une fissuration de surface importante, etc.) [12][136].

Les paramètres intervenant dans le phénomène de fissuration sont d'une part le trafic (% poids lourds, charges, vitesse, type d'essieux, etc.) et les conditions météorologiques (températures, ensoleillement, gel-dégel, etc.) et d'autre part les caractéristiques des couches mises en place (épaisseurs couches, teneur en liant, etc.). Concernant les matériaux, un bitume trop dur présente généralement une mauvaise résistance aux basses températures.

En Suisse, les chaussées sont principalement touchées par la fissuration thermique. Une chaussée proprement dimensionnée devrait permettre d'éviter l'apparition de fissuration par fatigue. L'apparition d'une fissure peut s'accompagner d'une détérioration rapide de l'état structurel et fonctionnel d'une chaussée. En effet, la propagation des fissures est un phénomène plutôt rapide et devrait être combattu dès l'apparition de la première fissure. Lorsqu'une fissure traverse l'intégralité des matériaux bitumineux, de l'eau peut s'infiltrer dans les couches inférieures et accentuer la dégradation de la chaussée.

Le phénomène de gel-dégel est un problème bien connu en Suisse. Un dimensionnement au gel conforme aux règles de l'art permet d'éviter au maximum l'apparition des fissures correspondantes à ce phénomène.

#### *6.1.2.2. La fissuration en tant que caractéristique d'état*

En Suisse, selon la norme SN 640 925b (2003) [135], la fissuration de surface est décrite par les indices  $I_0$  ou  $I_1$  (caractéristique d'état de dégradations de surface). Il s'agit d'indices évalués visuellement et caractérisés par l'étendue et la gravité des fissures selon le type de fissure considéré (transversales, faïençage, etc.). Les indices  $I_0$  et  $I_1$  font intervenir une multitude de caractéristiques de surface, telles que le ressuage, les nids de poule, les déformations de poussée ou les réparations.

Les fissures longitudinales, les fissures transversales et les fissures diverses peuvent être classées selon trois niveaux de gravités de la dégradation [136] :

- Gravité faible (niveau S=1) : Largeur des fissures inférieure à 2 mm.
- Gravité moyenne (niveau S=2) : Largeur des fissures entre 2 et 10 mm.
- Gravité élevée (niveau S=3) : Largeur des fissures supérieure ou égale à 10 mm.

La transformation en indice d'état ne peut se faire qu'en intégrant la totalité des sous-indices composant les indices  $I_0$  et  $I_1$ .

Les fissures par fatigue ne sont pas intégrées directement dans les caractéristiques d'état de la chaussée. Elles influencent par contre d'autres caractéristiques, telles que la portance ou les déformations des revêtements.

### 6.1.2.3. Modèles de comportement

Il existe plusieurs modèles de comportement permettant d'évaluer le comportement des enrobés par rapport à la fatigue et/ou aux conditions météorologiques (basses températures, cycles gel-dégel, etc.). Néanmoins, ces modèles ne s'intéressent pas proprement dit au phénomène de fissuration. En effet, la fissuration étant une conséquence d'une dégradation et non une performance mesurable.

La plupart des modèles de comportement font intervenir les conditions météorologiques de manière indirecte, c.-à-d. en considérant des variations des caractéristiques mécaniques des enrobés en fonction de ces conditions météorologiques.

### 6.1.3. Caractéristiques de surface

Il existe plusieurs types de dégradation des caractéristiques de surface des chaussées souples. En plus des fissures de surface, l'on peut mentionner des dégradations telles que la surface glissante, la déformation du revêtement, les réparations, mais également la qualité antidérapante. Ces dégradations ont principalement un impact sur la sécurité des usagers (apparition de pelades ou nids de poule, diminution d'adhérence, etc.) [12][136].

En Suisse, selon la norme SN 640 925b (2003) [135], les indices  $I_0$  ou  $I_1$  (caractéristique d'état de dégradations de surface) et l'indice  $I_4$  (qualité antidérapante) décrivent les caractéristiques de surface. Concernant les indices d'état de dégradations de surface il s'agit d'indices évalués visuellement et caractérisés par leur étendue et leur gravité. L'indice de qualité antidérapante doit lui être évalué à l'aide d'un appareil d'auscultation mesurant le coefficient de frottement d'une chaussée [136].

Il existe plusieurs modèles de comportement permettant d'évaluer les caractéristiques de surface des enrobés (adhérence, ressuage, etc.). La plupart des modèles font intervenir les conditions météorologiques de manière indirecte, c.-à-d. en considérant des variations des caractéristiques mécaniques des enrobés en fonction de ces conditions météorologiques.

## 6.2. La problématique de l'orniérage

Par la suite sont décrits plus en détail certains modèles de comportement et lois d'évolution spécifiques par rapport au phénomène d'orniérage ou de planéité transversale. Pour la présente thèse, parmi le nombre important de modèles existants dans le monde, ce sont principalement les modèles faisant intervenir les conditions météorologiques dans les lois d'évolution qui ont été retenues. Ceux-ci permettent en effet d'évaluer l'impact d'un changement de ces conditions sur le phénomène d'orniérage (Chapitres 6.2.1 à 6.2.6 pour les différents modèles ; Chapitre 6.2.7 pour une comparaison globale des résultats issus des différents modèles).

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'orniérage, trois cas réels ont été modélisés et comparés : le cas d'une autoroute (RGD) à Lonay (VD) présentant un trafic élevé mais un orniérage réel faible, le cas d'une route principale (RP) à Kleingurmels (FR) avec un trafic moyen et un faible orniérage réel et le cas d'une route principale (RP) à Delémont (JU) présentant un trafic moyen et un orniérage réel très élevé. Toutes les caractéristiques primaires de ces trois cas sont connues (conditions météorologiques, caractéristiques des structures, matériaux, etc.).

Le phénomène de changement climatique est dans cette première approche introduit par des hypothèses basées uniquement sur la variation des températures moyennes en Suisse (décalage des températures annuelles de  $x^\circ\text{C}$  – voir Fig. 6.5 pour l'exemple d'une augmentation de  $4^\circ\text{C}$ ). Ces hypothèses ne prennent pas en considération les différents scénarios climatiques issus du rapport de l'IPCC [59], ceux-ci étant évalués dans la deuxième approche (Chapitres 6.3 et 6.4) basée sur le modèle climatique de pronostic Meteonorm 7.0 (Chapitre 5.1).

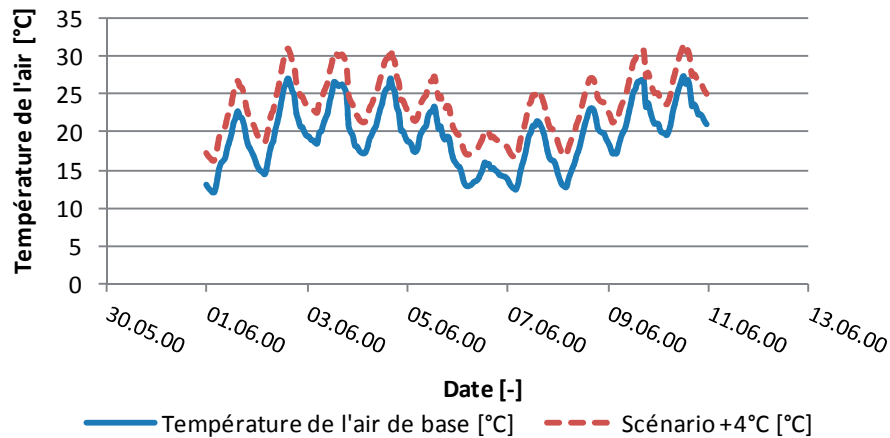


Fig. 6.5 – Exemple d'un scénario de changement des températures moyennes de +4°C (cas de Lonay).

### 6.2.1. Loi d'évolution de l'indice d'état de planéité transversale $I_3$ (Suisse) [35]

Au niveau suisse, une loi d'évolution de l'indice d'état de planéité transversale  $I_3$  a été proposée selon [35] d'après un rapport de recherche publié en 1990 sur le développement de modèles de comportement pour les systèmes de gestion de l'entretien. Ce modèle de comportement empirique prévoit l'évolution de l'orniérage en fonction de l'âge d'une chaussée uniquement :

$$I_3 = 4.2 - 0.55 \cdot \ln \text{age} \quad (\text{Équation 1})$$

Avec :  $I_3$  Indice d'état de planéité transversale [-]  
 age Age du revêtement [années]

Il est possible de réaliser un abaque simple de cette loi permettant de prévoir rapidement l'évolution de l'orniérage sur des routes suisses (Fig. 6.6).

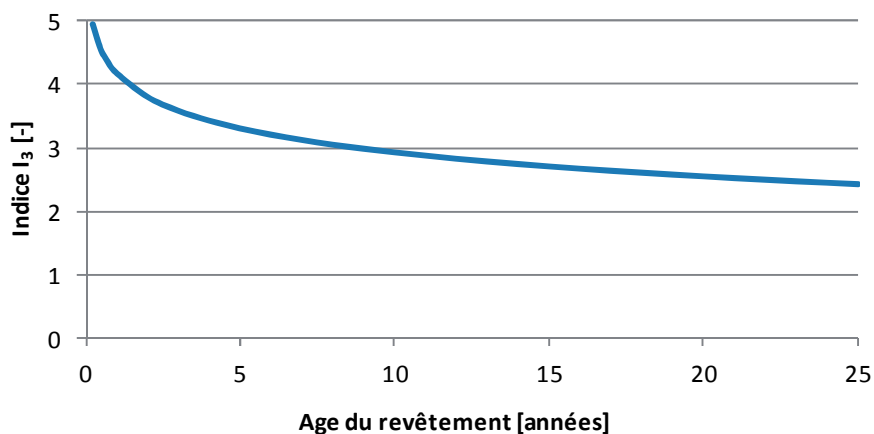


Fig. 6.6 – Evolution de l'indice de planéité transversale  $I_3$  en fonction de l'âge du revêtement.

En employant l'abaque de transformation d'une profondeur d'ornières en indice d'état  $I_3$  (Fig. 6.4), l'on peut finalement traduire directement l'âge d'un revêtement en profondeur d'ornières selon le type de route considérée [135].

### 6.2.1.1. Prise en compte des conditions météorologiques

Cette loi empirique ne fait pas intervenir directement les caractéristiques, telles que les conditions météorologiques ou le trafic réel pour une route donnée, dans la loi d'évolution. En effet, les coefficients du modèle ont été déterminés empiriquement pour des caractéristiques moyennes suisses. Il en suit que les conditions locales d'une chaussées ne sont pas introduites dans le modèle, et de ce fait l'analyse du changement des conditions météorologiques ne peut se faire qu'en passant par une adaptation des coefficients du modèle. Ainsi l'analyse directe de l'impact du changement climatique sur l'orniérage n'est pas possible car les coefficients du modèle sont basés sur des données historiques. Cette loi d'évolution n'a donc pas été prise en compte pour la suite de l'évaluation.

### 6.2.2. Modèle de comportement LAVOC [26]

Le laboratoire des voies de circulation (LAVOC) a mis au point une méthode prédictive de l'orniérage pour les revêtements bitumineux, basée sur l'essai d'orniérage employé en Suisse (essai à l'orniéreur – simulateur de trafic [121]). Cette méthode fait intervenir des paramètres liés aux caractéristiques des matériaux, du trafic et des conditions météorologiques. Elle s'appuie sur l'équation empirique d'orniérage des enrobés bitumineux la plus utilisée :

$$T = \alpha \cdot N^{\beta} \quad (\text{Équation 2})$$

|        |                 |  |     |
|--------|-----------------|--|-----|
| Avec : | T               | Profondeur d'ornières                              | [%] |
|        | N               | Nombre d'applications de charge (nombre d'essieux) | [-] |
|        | $\alpha, \beta$ | Coefficients du modèle                             | [-] |

Trois hypothèses de base sont prises en compte pour ce modèle :

1. Le phénomène d'orniérage réel que subit la chaussée suit la même fonction que celui qui est observé en laboratoire.
2. Il n'y a pas d'orniérage structurel ; l'orniérage se produit seulement dans le matériau bitumineux et non dans le sol.
3. Il n'y a pas de gradient de température dans la couche d'enrobé bitumineux ; la température est constante dans tout le matériau.

L'introduction des paramètres supplémentaires (matériaux, trafic, environnement du site) avec la prise en compte des hypothèses mentionnées aboutit finalement à une équation modifiée :

$$T = C_{\theta} \cdot \alpha \cdot \left( \frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^{\beta} + \delta \quad (\text{Équation 3})$$

|        |               |   |        |
|--------|---------------|---|--------|
| Avec : | T             | Profondeur d'ornières   | [mm]   |
|        | $C_{\theta}$  | Coefficient de correction pour la température   | [-]    |
|        | $\alpha$      | Profondeur d'ornière à 1000 cycles ;<br>Paramètre issu de l'essai d'orniérage                     | [mm]   |
|        | $\beta$       | Pente de la droite d'orniérage (en axes bilogarithmiques) ; Paramètre issu de l'essai d'orniérage | [-]    |
|        | W             | Nombre total d'essieux équivalents estimés (8.16 to)  | [ESAL] |
|        | $C_w, \delta$ | Constantes obtenues en maximisant la corrélation ornières in situ – résultat du calcul prédictif  | [-]    |
|        | $C_v$         | Coefficient de correction pour la vitesse   | [-]    |



Le coefficient pour la vitesse est déterminé par rapport à une vitesse de référence choisie à 50km/h et est inspiré du modèle de comportement BRRC (Chapitre 6.2.4). La formule du coefficient est donnée par :

$$C_V = 5 \cdot 10^{-5} \cdot V^{2.5177} \quad (\text{Équation 4})$$

Avec :  $V$  Vitesse effective moyenne des véhicules lourds (>3.5 to) [km/h]

Le coefficient pour la température est déterminé par rapport à une température de référence choisie à 50°C (température de référence retenue dans la recherche [26]) et est inspiré du modèle de comportement BRRC (Chapitre 6.2.4). La formule du coefficient est donnée par :

$$C_\theta = e^{\frac{\theta-50}{10.8}} \quad (\text{Équation 5})$$

Avec :  $\theta$  Température maximale pour une période de retour de 20 ans selon la méthode [3] (Chapitre 6.2.2.1) [°C]

Les valeurs des constantes qui ont été déterminées selon [26] sont :

$$C_w = 5.128 \cdot 10^{-3} [-] \quad \text{et} \quad \delta = 4.9 [-]$$

#### 6.2.2.1. Méthode de prédiction des températures développée par Angst [3]

Une méthode de prédiction des températures minimales et maximales des revêtements a été mise au point par un projet de recherche mené par Angst [3]. Ce projet s'est basé sur le programme de recherche américain SHRP (Strategic Highway Research Programm) et ses résultats ont été adaptés au contexte suisse. L'objectif de cette méthode étant de choisir un liant adapté aux conditions locales. La méthode permet de prendre en considération des caractéristiques locales de microclimat (ville, forêt, vallée, etc.) et s'appuie sur quatre paramètres de températures d'un revêtement :

- $T_{s_{\max, 50\%}}$  : Moyenne des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm.
- $T_{s_{\max, 95\%}}$  : Valeur la plus élevée sur 20 ans des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm (correspond au 95% quantile).
- $T_{s_{\min, 50\%}}$  : Valeur minimale de la température de revêtement pendant une année moyenne.
- $T_{s_{\min, 95\%}}$  : Valeur la plus basse sur 20 ans des températures minimales de revêtement (correspond au 95% quantile).

Les températures  $T_s$  maximales et minimales sont calculées à l'aide des formules suivantes :

$$T_s = d + (h \cdot c) + l \quad (\text{Équation 6})$$

|        |       |  |         |
|--------|-------|--|---------|
| Avec : | $T_s$ | Température du revêtement à 2 cm de profondeur   | [°C]    |
|        | $d$   | Température régionale de base en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer (Tab. 6.1) | [°C]    |
|        | $h$   | Altitude au-dessus du niveau de la mer   | [km]    |
|        | $c$   | Gradient de température régional en fonction de l'altitude (Tab. 6.1)                              | [°C/km] |
|        | $l$   | Valeur corrective par rapport à la situation locale (Tab. 6.2)                                     | [°C]    |

Les paramètres régionaux ont été adaptés du projet SHRP afin de mieux correspondre au contexte climatique suisse (Tab. 6.1 et Tab. 6.2).

| Région                      | Altitude<br>[m] | Ts <sub>min</sub> |      | Ts <sub>max</sub> |      |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|------|-------------------|------|
|                             |                 | d                 | c    | d                 | c    |
| Jura                        | 200 – 1700      | -8.3              | -5.5 | 46.9              | -5.0 |
| Lac Léman                   | 300 – 1700      | -6.4              | -7.3 | 46.1              | -3.0 |
| Plateau occidental          | 300 – 1700      | -6.8              | -6.7 | 46.1              | -3.0 |
| Plateau oriental / Préalpes | 300 – 1700      | -8.6              | -5.7 | 46.1              | -3.0 |
| Préalpes nord               | 300 – 2500      | -7.5              | -5.6 | 45.1              | -2.4 |
| Valais                      | 300 – 2500      | -8.3              | -4.8 | 49.1              | -4.5 |
| Grisons                     | 300 – 2500      | -8.2              | -6.5 | 47.7              | -3.4 |
| Sud des Alpes               | 200 – 2500      | -6.9              | -5.1 | 47.9              | -3.8 |

Tab. 6.1 – Températures régionales de base et gradients de température [3].

| Situation         | Minima<br>[°C] | Maxima<br>[°C] | Situation     | Minima<br>[°C] | Maxima<br>[°C] |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| Libre             | 0.0            | 0.0            | Versant sud   | 1.5            | 1.5            |
| Cuvette           | -2.5           | 0.0            | Versant est   | 0.7            | 0.0            |
| Nappe d'air froid | -6.0           | 1.0            | Versant ouest | 0.7            | 0.7            |
| Lac               | 2.0            | -0.5           | Forêt         | 0.0            | -6.0           |
| Ville             | 0.5            | 0.5            |               |                |                |

Tab. 6.2 – Valeurs correctives par rapport à la situation locale [3].

Etant donné les conditions météorologiques spécifiques des régions du Valais, des Grisons et du Sud des Alpes, l'équation de la température maximale est complétée à l'aide d'une fonction du 3<sup>ème</sup> degré :

$$TS_{max} = a \cdot h^3 + b \cdot h^2 + c \cdot h + d \quad (\text{Équation 7})$$

Avec : Ts Température du revêtement à 2 cm de profondeur [°C]  
h Altitude au-dessus du niveau de la mer [km]  
a,b,c,d Coefficients de la fonction (Tab. 6.3) [°C]

| Région        | Altitude<br>[m] | Coefficients |      |       |      |
|---------------|-----------------|--------------|------|-------|------|
|               |                 | a            | b    | c     | d    |
| Valais        | 300 – 2500      | -5.9         | 26.1 | -37.8 | 60.3 |
| Grisons       | 300 – 2500      | -4.2         | 15.5 | -19.6 | 51.8 |
| Sud des Alpes | 200 – 2500      | -4.2         | 15.2 | -17.2 | 50.2 |

Tab. 6.3 – Coefficients de la fonction pour les régions Valais, Grisons et Sud des Alpes [3].

Ensuite, les températures maximales et minimales sont obtenues à l'aide des formules suivantes :

$$Ts_{min,95\%} = Ts_{min,50\%} - 1.77 \cdot sd_{min} \quad (\text{Équation 8})$$

$$Ts_{max,95\%} = Ts_{max,50\%} + 1.77 \cdot sd_{max} \quad (\text{Équation 9})$$

|        |                 |   |      |
|--------|-----------------|---|------|
| Avec : | $Ts_{min,95\%}$ | Valeur la plus basse sur 20 ans des températures minimales de revêtement (correspond au 95% quantile)   | [°C] |
|        | $Ts_{min,50\%}$ | Valeur minimale de la température de revêtement pendant une année moyenne   | [°C] |
|        | $Ts_{max,95\%}$ | Valeur la plus élevée sur 20 ans des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm (correspond au 95% quantile) | [°C] |
|        | $Ts_{max,50\%}$ | Moyenne des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm   | [°C] |
|        | $sd_{min}$      | Ecart-type standard en fonction de l'altitude (en km) (Tab. 6.4)  | [°C] |
|        | $sd_{max}$      | Ecart-type standard en fonction de l'altitude (en km) (Tab. 6.4)  | [°C] |

| Région                         | Ecart-type standard |                    |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|
|                                | $sd_{min}$          | $sd_{max}$         |
| En général                     | $3.3+0.52 \cdot h$  | $0.8+0.23 \cdot h$ |
| Valais, Grisons, Sud des Alpes | $1.4+1.31 \cdot h$  | -                  |
| Vallées alpines                | -                   | $0.5+0.24 \cdot h$ |

Tab. 6.4 – Ecart-type standard selon les régions [3].

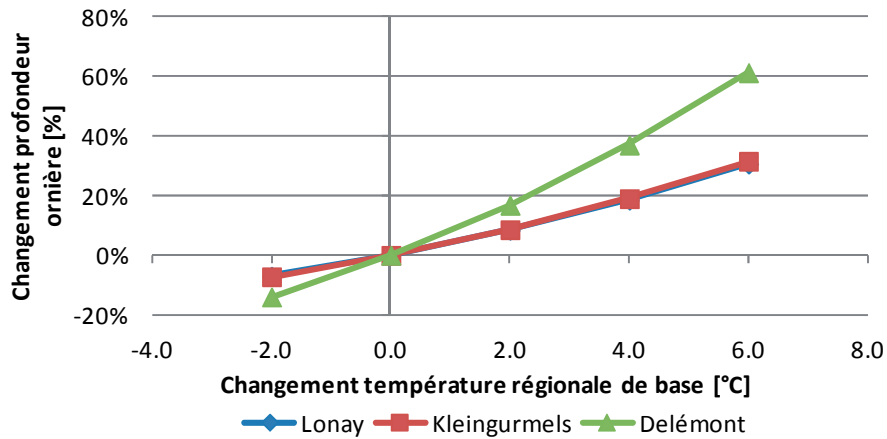
#### 6.2.2.2. Prise en compte des conditions météorologiques

Les conditions météorologiques sont prises en compte sous forme d'un coefficient de correction pour la température  $C_0$ . Ce coefficient est basé sur les températures maximales pour des périodes de retour de 20 ans, calculées selon la méthode Angst [3]. Les températures locales interviennent directement dans le calcul des profondeurs d'ornièrre. Une adaptation des températures aura donc une influence directe sur cette profondeur.

#### 6.2.2.3. Impacts du changement climatique sur l'ornièrre

Le changement climatique aura un impact direct sur les températures maximales en Suisse et donc sur la température maximale du site et la profondeur d'ornièrre selon la méthode LAVOC. L'impact peut porter sur un changement de l'intensité des températures, mais également sur un changement de la fréquence d'apparition de conditions extrêmes.

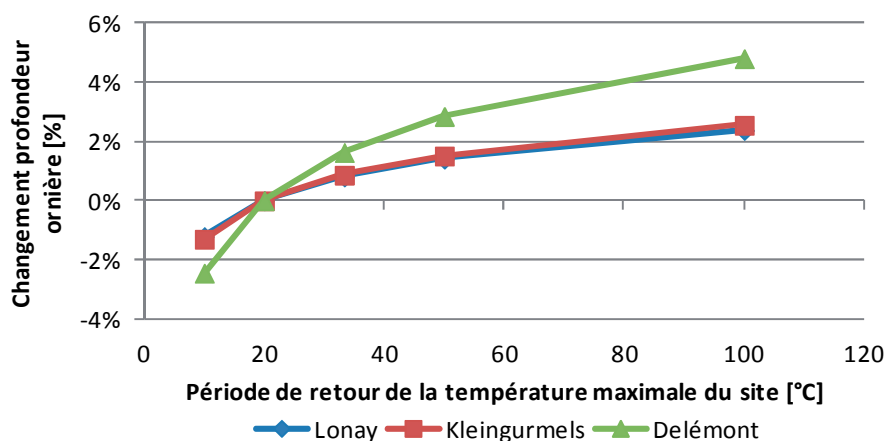
Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'ornièrre, les trois cas spécifiques ont été comparés : Lonay, Kleingurmels et Delémont. Les paramètres utilisés ainsi que les hypothèses posées et les résultats des calculs sont ceux employés pour le développement du modèle [26]. Ils sont donnés en annexe (Annexe 10.1.1). La profondeur d'ornièrre calculée selon la méthode LAVOC est de 8.4 mm pour Lonay, 8.5 mm pour Kleingurmels et 28.0 mm pour Delémont. Dans la figure ci-après est donné un aperçu du possible changement de la profondeur d'ornièrre en fonction du changement de la température locale du site (Fig. 6.7).



**Fig. 6.7** – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière par rapport au changement de température régionale de base du site.

Une augmentation de la température régionale de base (Tab. 6.1) de +2°C aura comme influence une augmentation de la profondeur d'ornière d'environ 9% pour les cas de Lonay et Kleingurmels (Lonay : 8.4% ; Kleingurmels : 8.7%) et de 16.8% pour le cas de Delémont. Pour une augmentation plus marquée de +4 ou +6°C, la profondeur d'ornière ne varie que légèrement selon les deux premiers cas mais reste très élevée pour le cas de Delémont. Pour une augmentation de la température de +4°C, la profondeur d'ornière augmente entre 18.5% (Lonay) et 37.0% (Delémont), alors que pour une hausse de +6°C, l'augmentation de la profondeur d'ornière se situe entre 30.7% (Lonay) et 61.3% (Delémont). L'augmentation est quasiment linéaire pour les trois cas. Les cas de Lonay et Kleingurmels présentent une bonne résistance, même avec des trafics complètement différents.

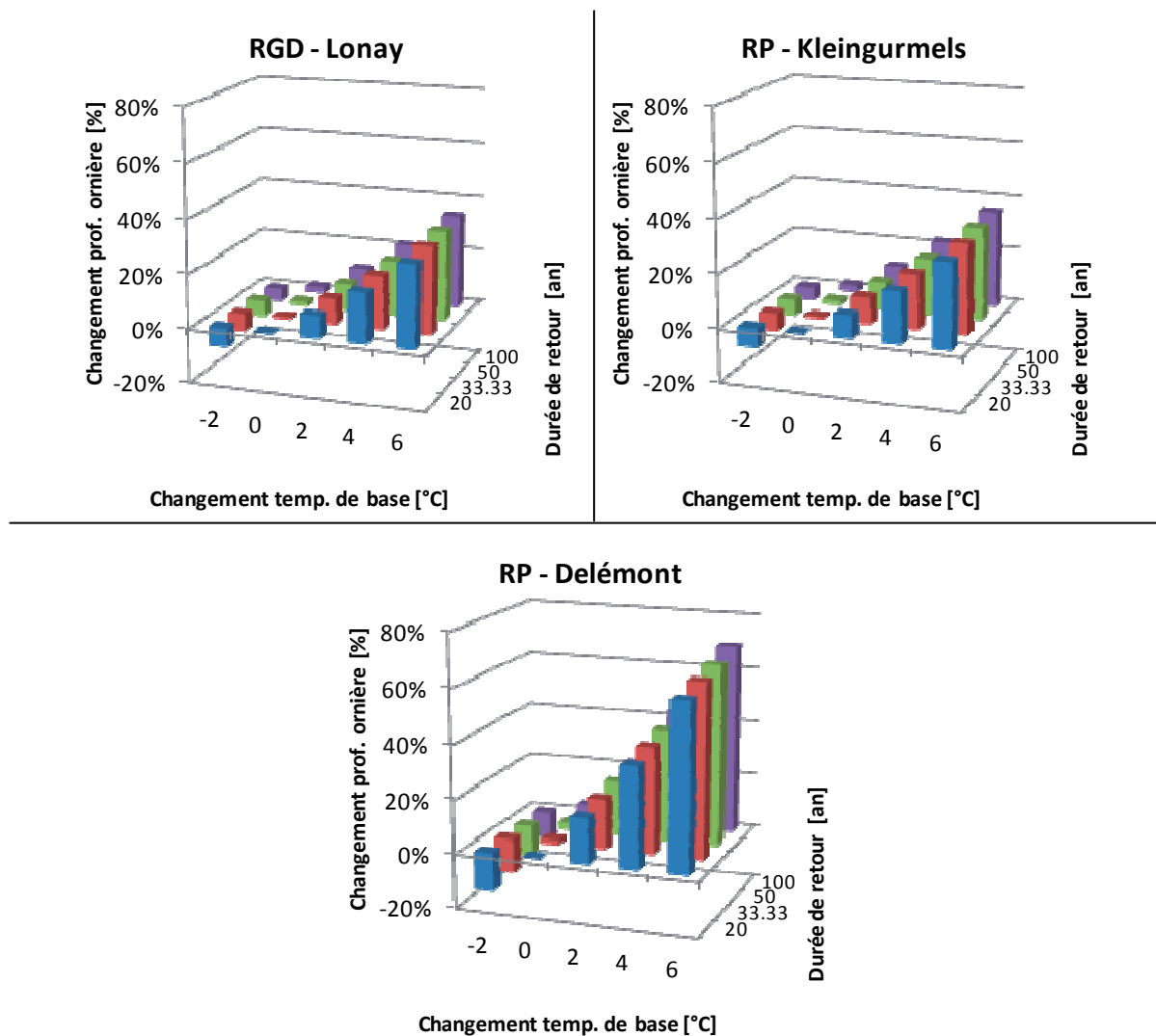
Selon la méthode [3], la température maximale est calculée pour une période de retour de 20 ans, c.-à-d. pour une température maximale se produisant seulement une fois tous les 20 ans. Le changement climatique risquant de changer la fréquence d'apparition de conditions extrêmes, l'influence de la période de retour est à intégrer dans l'évaluation de l'orniérage. Dans la figure ci-après est donné un aperçu du changement de la profondeur d'ornière en fonction du changement de la période de retour de la température maximale du site (Fig. 6.8).



**Fig. 6.8** – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière pour un changement de la période de retour de la température maximale par rapport à la période actuelle de 20 ans.

Un changement de la période de retour de la température maximale aura un impact plutôt faible sur la formation et le développement d'ornières. Si au lieu de choisir des températures maximales apparaissent seulement une fois tous les 20 ans, l'on choisit des températures se produisant une fois tous les 50 ans, une augmentation de la profondeur d'ornière entre 1.4% (Lonay) et 2.8% (Delémont) peut être constatée. Si une température maximale se produisant seulement une fois tous les 100 ans est prise en compte, cette augmentation se situe entre 2.4% (Lonay) et 4.8% (Delémont). L'augmentation est asymptotique pour les trois cas.

Les modélisations du climat futur prédisent un changement de l'intensité des températures, mais également un changement de la fréquence d'apparition de conditions extrêmes. Dans la figure ci-après est donc donné un aperçu du possible changement de la profondeur d'ornière en fonction du changement de la température locale et de la période de retour de la température maximale du site (Fig. 6.9).



**Fig. 6.9** – Méthode LAVOC : Evolution de la profondeur d'ornière par rapport au changement de température régionale de base du site et de la période de retour de la température maximale.

Un changement de la période de retour de la température maximale de 20 à 50 ans couplé avec une augmentation de la température maximale du site de +4°C aura par exemple comme influence une augmentation de la profondeur d'ornière entre 20.4% (Lonay) et 41.1% (Delémont).

#### 6.2.2.4. Impacts sur la durée de vie d'une chaussée

Comme mentionné, en Suisse, l'orniérage est décrit par l'indice  $I_3$  (caractéristique d'état de la planéité transversale) et l'indice  $I_1$  (caractéristique de dégradation de surface) [135]. L'indice de dégradation de surface ( $I_1$ ) caractérise l'ensemble des dégradations de surface en y incluant la profondeur d'ornière évaluée visuellement. Cet indice visuel n'est pas très caractéristique pour le calcul de la durée de vie d'une chaussée, car il est dépendant de plusieurs autres facteurs.

L'indice de planéité transversale ( $I_3$ ) caractérise la planéité transversale qui dépend uniquement de l'orniérage. Les impacts du changement climatique sur la durée de vie d'une chaussée par rapport au phénomène d'orniérage peuvent donc être évalués en employant cet indice d'état issu de la norme SN 640 925b (2003) [135]. Les valeurs limites de l'indice  $I_3$  ont déjà été décrits ci-avant (Chapitre 6.1.1.2).

Dans la figure ci-après est donné un aperçu du possible changement du degré de gravité selon l'indice de caractéristique de la planéité transversale  $I_3$  pour différents changements de la température locale et pour une période de retour de 50 ans de la température maximale du site (Fig. 6.10).

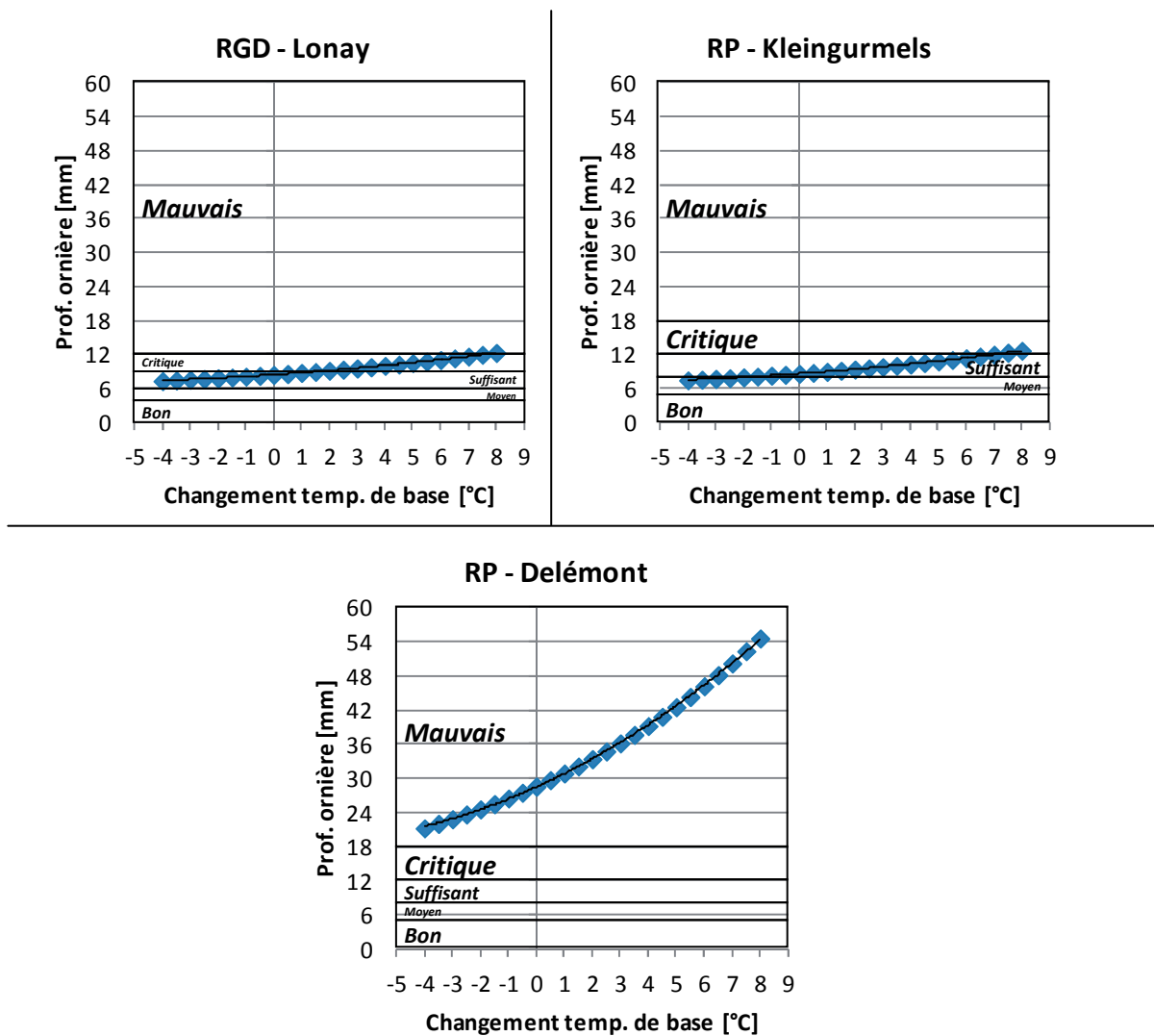
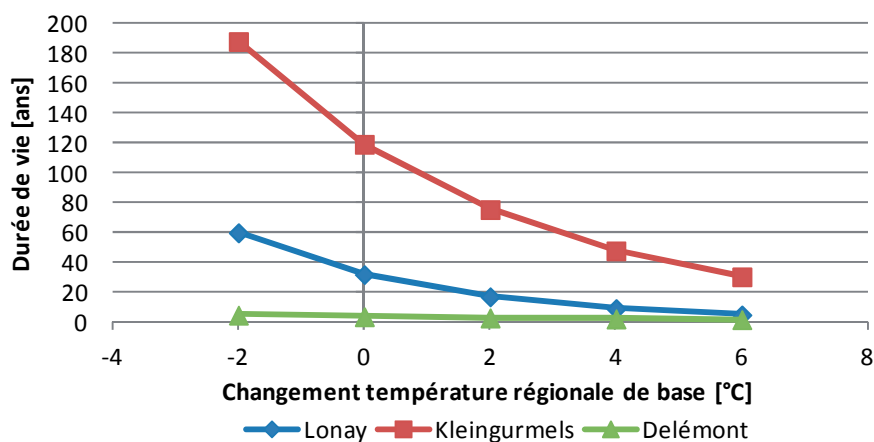


Fig. 6.10 – Méthode LAVOC : Degré de gravité selon l'indice de caractéristique de la planéité transversale  $I_3$ .

L'orniérage de la route à grand débit à Lonay et de la route principale à Kleingurmels se trouve dans un état suffisant dans le cas sans changements de la température ( $T = 8.4$  mm pour Lonay, respectivement  $8.5$  mm pour Kleingurmels). Une augmentation de la température locale et de la période de retour aura comme conséquence que l'état de l'indice devienne critique (à partir d'une augmentation de  $1.5^{\circ}\text{C}$  pour Lonay ; à partir d'une augmentation de  $7.0^{\circ}\text{C}$  pour Kleingurmels). Pour la route à grand débit, l'état peut même devenir mauvais pour une augmentation plus marquée de la température locale du site ( $\Delta T = +7.5^{\circ}\text{C}$ ). Concernant la route principale à Delémont, l'indice  $I_3$  se trouve déjà dans un état mauvais.

Dans la figure ci-après est donné un aperçu du possible changement de la durée de vie des revêtements pour un état critique de l'indice de caractéristique de la planéité transversale  $I_3$ . Différents changements de la température locale pour une période de retour de 50 ans de la température maximale du site sont exposés (Fig. 6.11). Les données détaillées peuvent être consultées en annexe (Annexe 10.1.1).



**Fig. 6.11** – Méthode LAVOC : Evolution de la durée de vie pour un état critique de l'indice  $I_3$  par rapport au changement de la température régionale de base.

La durée de vie du revêtement à Lonay passe d'environ 32 ans sans changement des températures du site à environ 17 ans pour une augmentation de  $2^{\circ}\text{C}$ , à 9 ans pour une augmentation de  $4^{\circ}\text{C}$  et à 5 ans pour une augmentation de  $6^{\circ}\text{C}$ . La durée de vie du revêtement à Kleingurmels est beaucoup plus élevée du fait que les valeurs limites de l'orniérage pour les routes principales sont plus élevées que pour les routes à grand débit. Ainsi sa durée de vie passe d'environ 120 ans sans changement des températures du site à environ 30 ans pour une augmentation de  $6^{\circ}\text{C}$ . Concernant la route principale à Delémont, le revêtement semble avoir été mal dimensionné sa durée de vie étant à environ 4 ans sans changement des températures du site. Notons que dans la réalité d'autres facteurs peuvent limiter la durée de vie des chaussées (caractéristiques de surface, etc.).

### 6.2.3. Modèle de comportement HDM-4 [5]

Le modèle de comportement HDM-4 a été développé par la Banque Mondiale et est distribué par l'Association Mondiale de la Route (AIPCR). Le but de ce modèle est de donner des outils performants aux pays qui n'ont pas les possibilités financières de développer des modèles de comportement.

Le modèle permet de prévoir le comportement d'une route en s'intéressant à plusieurs performances (orniérage, fissuration, adhérence, etc.). Concernant l'orniérage, HDM-4 modélise la profondeur d'ornière à l'aide de quatre causes possibles : la densité initiale, la déformation structurelle, la déformation plastique et l'usure due aux pneus cloutés. La profondeur d'ornières à un temps donné correspond la somme de ces quatre composants.

### 6.2.3.1. Prise en compte des conditions météorologiques

Le seul paramètre météorologique prise en compte de manière directe est la précipitation mensuelle moyenne pour le calcul des déformations structurelles. Les précipitations jouent le rôle d'accélérateur des déformations, mais uniquement lorsque la chaussée est fissurée. Les températures ne sont pas considérées de manière directe dans le calcul de la profondeur d'ornières.

### 6.2.3.2. Impacts du changement climatique sur l'orniérage

L'impact du changement climatique, sous forme de changement des précipitations, intervient directement dans la déformation structurelle de la chaussée lorsque celle-ci est fissurée. Ce modèle de comportement ne permet que difficilement de prévoir l'impact du changement climatique sur le phénomène d'orniérage. Le modèle n'étant peu adapté, il n'a donc pas été pris en compte pour la suite de l'évaluation.

## 6.2.4. Modèle de comportement BRRC [19]

En Belgique, le Centre de Recherches Routières (CRR – BRRC) a mis au point une méthode de prédiction de l'orniérage basés sur l'analyse des résultats d'un grand nombre d'essais triaxiaux dynamiques. Cette méthode, développée par Louis Francken, s'appuie sur l'évaluation de la déformation plastique des chaussées en fonction du nombre de cycles de charge appliqués :

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2 \cdot E_p(V, T)} \cdot \left[ \frac{N}{450 \cdot V} \right]^{1/4} \quad (\text{Équation 10})$$

|        |                      |   |        |
|--------|----------------------|---|--------|
| Avec : | $\varepsilon_p$      | Déformation permanente  | [-]    |
|        | $\sigma_v, \sigma_h$ | Contraintes principales verticales et horizontales sous l'effet d'une charge  | [-]    |
|        | $E_p$                | Module de déformation permanente dépendant de la vitesse et de la température | [-]    |
|        | V                    | Vitesse du véhicule   | [km/h] |
|        | T                    | Température   | [°C]   |
|        | N                    | Nombre de cycles de charge  | [-]    |

La profondeur d'ornières calculée avec cette méthode est liée au nombre de charges appliquées sans tenir compte des variations de l'intensité des charges de trafic.

La déformation permanente peut par la suite être transformée en déplacement de surface pour la prédiction de la profondeur d'ornières. Pour faire ceci, les déformations permanentes des différentes couches composant la chaussée sont additionnées :

$$u_{perm} = \sum_i h_i \cdot \varepsilon_{pi} \quad (\text{Équation 11})$$

|        |                    |                                       |      |
|--------|--------------------|---------------------------------------|------|
| Avec : | $u_{perm}$         | Déplacement permanent en surface      | [mm] |
|        | $h_i$              | Épaisseur de la couche i              | [mm] |
|        | $\varepsilon_{pi}$ | Déformation permanente de la couche i | [-]  |

La méthode belge a la particularité de faire intervenir le module de déformation permanente ainsi que les contraintes principales pour le calcul de la profondeur d'ornières. Ces paramètres sont notamment fonction de la formulation des enrobés composant la chaussée.  $E_p$  est déterminé à l'aide du logiciel spécifique PAMINA développé par le BRRC.  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  sont obtenues en modélisant la chaussée par un calcul élastique-linéaire, ce qui nécessite de connaître les modules des différents



matériaux. Ces modules peuvent être déterminés à partir d'un logiciel de dimensionnement (p.ex. NOAH, Alizé) ou alors calculés à l'aide de formules de détermination des modules complexes des enrobés (p.ex. Heukelom et Klomp).

La méthode belge est principalement utilisée pour la comparaison des comportements relatifs de différents types d'enrobés par rapport aux déformations permanentes. La détermination quantitative de la profondeur d'ornières est plus délicate à effectuer avec ce modèle. En effet l'orniérage correspond à un phénomène plastique, alors que la méthode belge utilise une approche élastique-linéaire pour la détermination des contraintes principales. Néanmoins, le comportement relatif de deux types d'enrobés peut être obtenu en analysant le ratio entre les profondeurs d'ornières des deux matériaux. Pour ceci, l'on considère que les structures présentent le même état de contrainte :

$$r = \frac{u_{perm,1}}{u_{perm,2}} = \frac{\varepsilon_{p,1}}{\varepsilon_{p,2}} = \frac{E_{p,2}(V,T)}{E_{p,1}(V,T)} \quad (\text{Équation 12})$$

#### 6.2.4.1. Prise en compte des conditions météorologiques

Le modèle de comportement belge fait intervenir les caractéristiques de températures à travers le module de déformation permanente des différentes couches d'enrobés composant la chaussée. Une augmentation de la température diminue le module et par conséquent augmente la déformation permanente ainsi que le déplacement en surface.

#### 6.2.4.2. Impacts du changement climatique sur l'orniérage

Le changement climatique, appliqué à la méthode belge, porte uniquement sur un changement de l'intensité des températures. Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'orniérage, les trois cas spécifiques ont été comparés : Lonay, Kleingurmels et Delémont. Les paramètres ainsi que les hypothèses établis et les résultats des calculs sont donnés en détail en annexe (Annexe 10.1.2). Concernant les températures retenues, il s'agit de températures maximales pour une période de retour de 20 ans selon la méthode [3] (Chapitre 6.2.2.1).

La comparaison des profondeurs d'ornière calculées selon la méthode BRRC peut se faire de manière relative en posant comme hypothèse que les contraintes principales ne changent pas en fonction de la température. Dans ce cas, seuls les modules de déformation permanente doivent être déterminés, alors que pour une comparaison absolue des calculs des contraintes seraient nécessaires, et ceci pour chaque passage de charge avec des conditions extérieures (températures) spécifiques. Dans la figure Fig. 6.12 ci-après est donné un aperçu du possible changement relatif de la profondeur d'ornière en fonction du changement de la température locale du site.

Une augmentation de la température de +2°C aura comme influence une augmentation de la profondeur d'ornière d'environ 18% pour les cas Lonay et Kleingurmels et de 22% pour le cas Delémont. Pour une augmentation plus marquée de +4 la profondeur d'ornière augmente entre 38% (Lonay) et 49% (Delémont), alors que pour une hausse de +6°C, l'augmentation de la profondeur d'ornière se situe entre 63% (Lonay) et 82.2% (Delémont). L'augmentation est quasiment linéaire pour les trois cas.

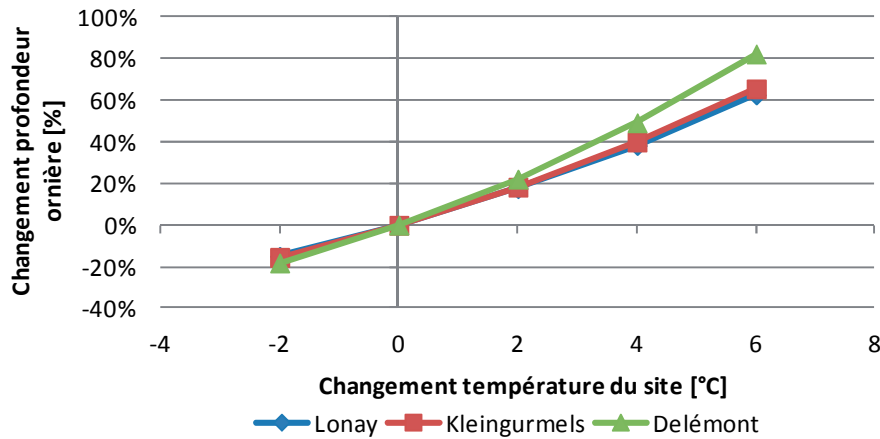


Fig. 6.12 – Méthode BRRC : Evolution de la profondeur d'ornière relative par rapport au changement de température du site.

#### 6.2.4.3. Impacts sur la durée de vie d'une chaussée

Le calcul des déformations absolues n'est possible qu'en calculant chaque cas de charge (charge – température extérieure) et ceci sur la durée de vie entière. Il s'agit donc d'un calcul incrémental complexe qui n'est pas réalisable avec les logiciels tels que NOAH ou Alizé. Le modèle M-E PDG reprend ces considérations dans sa méthodologie (Chapitre 6.2.6).

En se basant sur la comparaison relative, nous pouvons néanmoins affirmer qu'une augmentation de la température des trois sites aura comme conséquence une diminution de leur durée de vie. Cette diminution semble plus marquée pour le cas de Delémont.

#### 6.2.5. Modèle de comportement suédois [18]

Les suédois ont mis au point un modèle de prédiction de l'orniérage pour leur réseau routier. Ce modèle a la particularité d'être basé sur des mesures de déflexions effectuées à l'aide du Falling Weight Deflectometer (FWD). Il s'agit d'un modèle prenant en compte uniquement l'orniérage structurel. La formule permettant de prédire la profondeur d'ornière est la suivante :

$$S = 13.41 + 0.11 \cdot T_{age} + 8.41 \cdot 10^{-4} \cdot \sum ADT - 0.8 \cdot W - 2.06 \cdot 10^{-2} \cdot th_1 + 0.41 \cdot D_0 + 1.26 \cdot 10^{-3} \cdot FI - 0.11 \cdot HV \quad (\text{Équation 13})$$

|        |           |  |        |
|--------|-----------|--|--------|
| Avec : | S         | Profondeur d'ornières  | [mm]   |
|        | $T_{age}$ | Age de la route  | [an]   |
|        | ADT       | Nombre de véhicules dans une direction (en millier)                              | [-]    |
|        | W         | Largeur de la route  | [m]    |
|        | $th_1$    | Épaisseur des couches bitumineuses   | [mm]   |
|        | $D_0$     | Déflexion (FWD) au centre pour une charge de 50kN                                | [mm]   |
|        | FI        | Indice de gel  | [°C·j] |
|        | HV        | Ratio entre ADT et nombre d'ESAL par jour (pour une charge équivalente de 100kN) | [-]    |

#### *6.2.5.1. Prise en compte des conditions météorologiques*

Les conditions météorologiques sont prises en compte dans le modèle de comportement suédois sous forme d'indice de gel FI. Ce cas est plutôt spécifique aux pays nordiques, où l'orniérage se produit principalement au niveau des fondations par l'action de cycles gel-dégel répétés. Ainsi une augmentation de l'indice de gel (correspondant à des conditions hivernales plus rudes) se traduit par une augmentation de la profondeur d'ornières.

La problématique des températures élevées pour la formation et la propagation des ornières de surface n'est pas prise en compte dans le modèle suédois.

#### *6.2.5.2. Impacts du changement climatique sur l'orniérage*

L'impact du changement climatique, sous forme de changement des températures, intervient directement dans l'indice de gel FI. Ce modèle de comportement n'est que difficilement applicable au contexte suisse, où le phénomène d'orniérage est plutôt dû aux températures maximales en été (orniérage des couches supérieures). En effet, un réchauffement des températures d'un site se traduit par une diminution de l'indice de gel, et ainsi par une diminution de la profondeur d'ornières selon le modèle suédois. Le modèle s'intéresse donc uniquement au phénomène d'orniérage des couches de fondations et est de ce fait peu adapté. Il n'a donc pas été pris en compte pour la suite de l'évaluation.

### **6.2.6. Modèle de comportement M-E PDG [25]**

L'outil de dimensionnement M-E PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), permet de modéliser plusieurs performances des revêtements, dont l'orniérage, de manière incrémentale. Son fonctionnement et le modèle utilisé pour prévoir l'orniérage sont décrits dans les Chapitres 6.4.1 et 6.4.2.

#### *6.2.6.1. Prise en compte des conditions météorologiques*

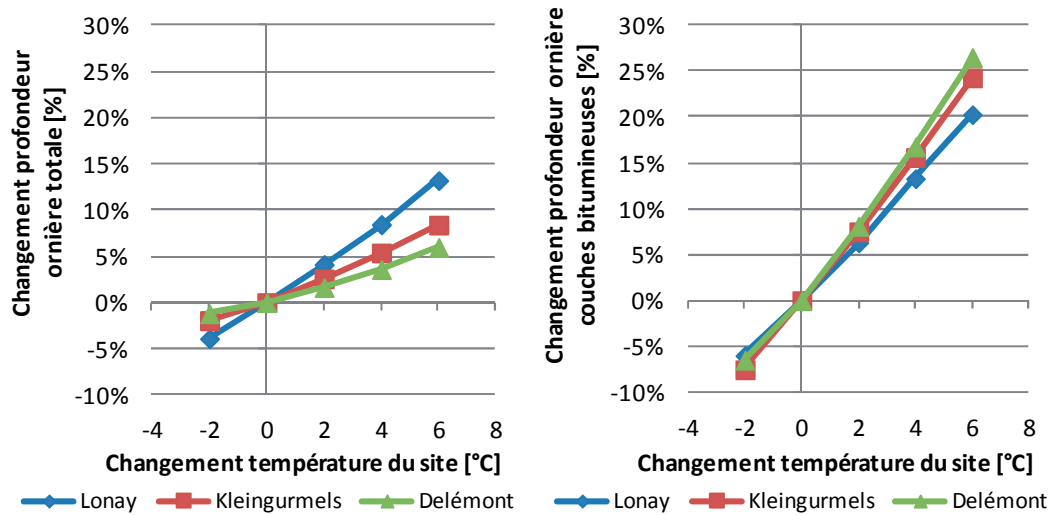
Le modèle de comportement M-E PDG fait intervenir des caractéristiques météorologiques détaillées (températures, précipitation, radiation solaire, vitesse du vent et humidité relative). Ces paramètres sont intégrés sous forme de données horaires dans le modèle climatique EICM permettant de calculer la température et des caractéristiques liées à l'humidité dans la structure à tout moment du cycle de vie. Finalement, ces données sont utilisées pour déterminer les caractéristiques des matériaux composant la structure entière (module, profondeur de gel, drainage, etc.).

#### *6.2.6.2. Impacts du changement climatique sur l'orniérage*

Le changement climatique, appliqué à la méthode M-E PDG, porte sur un changement de l'intensité des températures ainsi que sur un changement des régimes de précipitation, de radiation solaire, de vent et d'humidité relative.

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'orniérage, les trois cas spécifiques déjà modélisés pour les autres modèles ont été comparés : Lonay, Kleingurmels et Delémont. Les paramètres ainsi que les hypothèses établis et les résultats des calculs sont donnés en détail en annexe (Annexe 10.1.3). Concernant les paramètres météorologiques, les données issues du réseau MétéoSuisse ont été utilisées. Pour les trois cas modélisés, les données horaires pour la période 2000 à 2010 provenant de la station météorologique la plus proche par rapport à l'emplacement de la route ont été employées. L'outil M-E PDG a extrapolé ces données afin de posséder des données continues sur toute la durée de vie des chaussées évaluées. Dans ce chapitre, un changement constant de la température de l'air a été analysé.

La profondeur d'ornière calculée selon la méthode M-E PDG est de 11.7 mm pour Lonay (dont 7.7 mm dans les couches bitumineuses), 11.8 mm pour Kleingurmels (dont 4.4 mm dans les couches bitumineuses) et 17.0 mm pour Delémont (dont 4.7 mm dans les couches bitumineuses). Dans la figure ci-après est donné un aperçu du possible changement de la profondeur d'ornière en fonction du changement de la température locale du site (Fig. 6.13).



**Fig. 6.13** – Méthode M-E PDG : Evolution de la profondeur d'ornière totale (gauche) et des couches bitumineuses uniquement (droite) par rapport au changement de température du site.

Une augmentation de la température de +2°C aura comme influence une augmentation de la profondeur d'ornière totale située entre 1.6 et 4.1% et de la profondeur d'ornière des couches bitumineuses entre 6.3 et 8.1% pour les trois cas. Pour une augmentation plus marquée de +4°C la profondeur d'ornière totale augmente entre 3.6% (Delémont) et 8.4% (Lonay) et la profondeur d'ornière des couches bitumineuses entre 13.3% (Lonay) et 16.8% (Delémont). Pour une hausse des températures encore plus élevées (+6°C), une augmentation de la profondeur d'ornière totale de 13.2% (Lonay) et une augmentation de la profondeur d'ornière des couches bitumineuses de 26.5% (Delémont) peut être atteinte. Les augmentations sont quasiment linéaires pour les trois cas. Les augmentations se produisent en outre uniquement dans les couches bitumineuses pour les cas de Lonay et de Kleingurmels, et de manière très limitée dans les couches de fondation et dans la plateforme pour le cas de Delémont (augmentations inférieures à 1 mm).

### 6.2.6.3. Impacts sur la durée de vie d'une chaussée

Le possible changement du degré de gravité selon l'indice de caractéristique de dégradation de surface  $I_3$  pour différents changements de la température locale a de nouveau été évalué. Les résultats pour les trois cas peuvent être consultés dans les figures ci-après (Fig. 6.14). Les valeurs limites de l'indice  $I_3$  selon la norme SN 640 925b (2003) [135] ont déjà été décrits ci-avant (Chapitre 6.1.1.2).

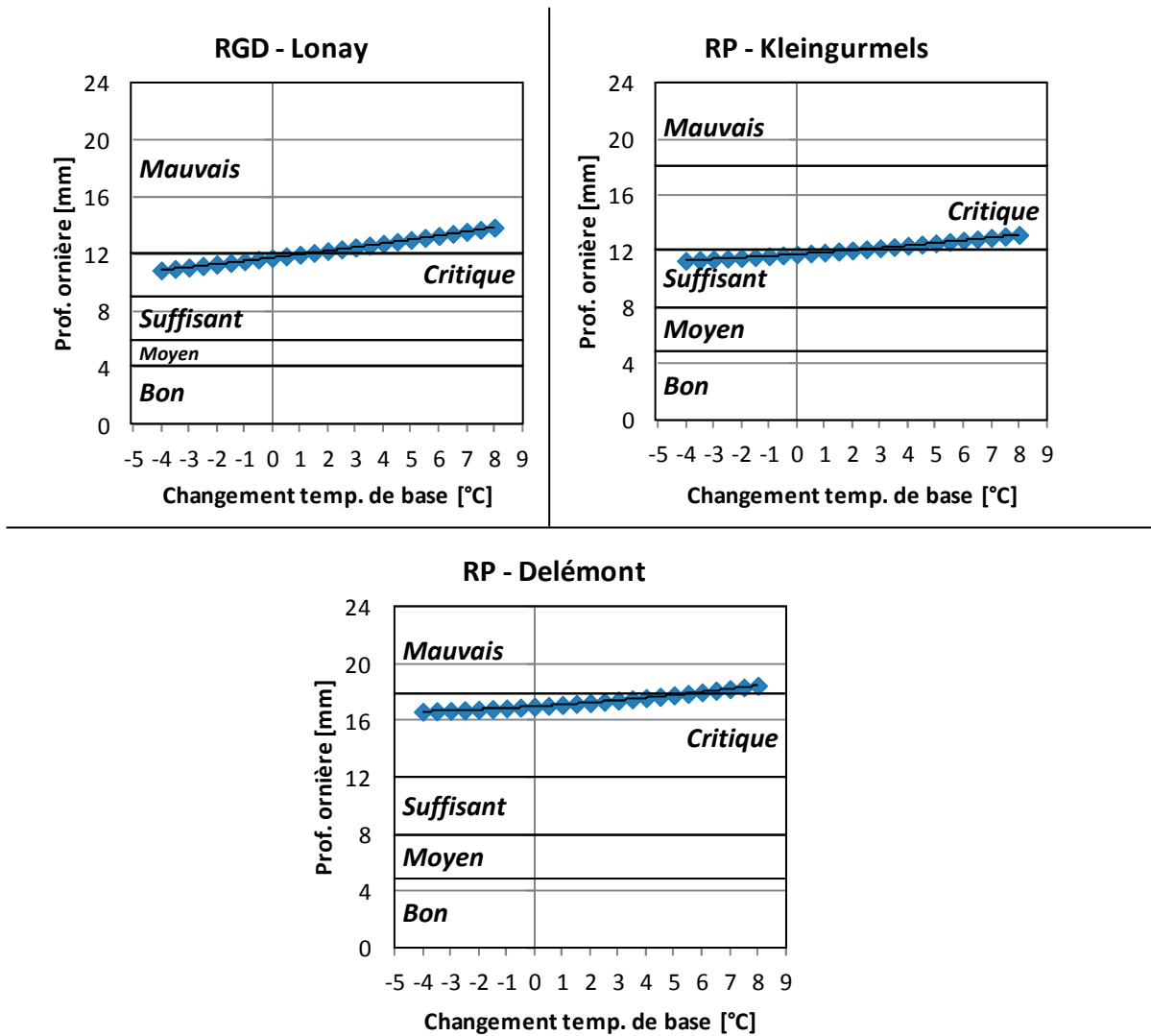


Fig. 6.14 – Méthode M-E PDG : Degré de gravité selon l'indice de caractéristique de dégradation de surface  $I_3$ .

L'orniérage de la route à grand débit à Lonay et de la route principale à Delémont se trouve dans un état critique. Une augmentation de la température locale de 1°C pour Lonay, respectivement 6°C pour Delémont, aura comme conséquence que l'état de l'indice devienne mauvais. La route principale à Kleingurmels se trouve dans un état suffisant, mais une augmentation de la température locale de 1.5°C ferait passer la route dans un état critique.

Dans la figure ci-après est donné un aperçu du possible changement de la durée de vie des revêtements pour un état critique de l'indice de caractéristique de la planéité transversale  $I_3$ . Différents changements de la température locale sont exposés (Fig. 6.15).

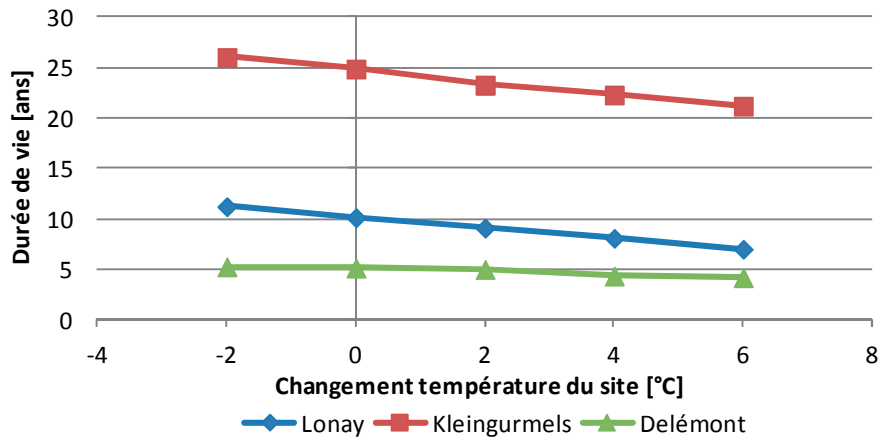


Fig. 6.15 – Méthode M-E PDG : Evolution de la durée de vie pour un état critique de l'indice  $I_3$  par rapport au changement de la température du site.

La durée de vie du revêtement à Lonay passe d'environ 10 ans sans changement des températures du site à environ 7 ans pour une augmentation de 6°C. La durée de vie du revêtement à Kleingurmels est beaucoup plus élevée du fait que les valeurs limites de l'orniérage pour les routes principales sont plus élevées que pour les routes à grand débit. Ainsi sa durée de vie passe d'environ 25 ans sans changement des températures du site à environ 21 ans pour une augmentation de 6°C. Concernant la route principale à Delémont, sa durée de vie est très faible et se situe à environ 5 ans sans changement des températures du site et à environ 4 ans pour une augmentation de 6°C. Les cas de Lonay ainsi que de Delémont semblent mal dimensionnés selon les résultats obtenus à l'aide du modèle M-E PDG étant donné que leur durée de vie est inférieure à 20 ans.

Les résultats obtenus par la modélisation M-E PDG donnent des indications intéressantes, mais il convient de mentionner qu'un nombre important d'hypothèses a dû être posé pour cette modélisation. En effet, les données concernant les couches de fondation et de plateforme n'étaient pas assez détaillées pour effectuer une comparaison idéale. Surtout pour le cas de Delémont, qui présente un orniérage très prononcé in-situ les données à disposition ne permettent pas de modéliser adéquatement l'infrastructure de la chaussée.

#### 6.2.6.4. Impacts sur les autres performances des chaussées

Le modèle M-E PDG ne permet pas seulement de prédire l'orniérage d'une structure routière, mais également ses propriétés fonctionnelles (à travers l'indice d'uni IRI – International Roughness Index) ainsi que sa fissuration thermique et par fatigue. La fissuration est partagée en fissuration du haut vers le bas, fissuration partant de la surface et descendant dans les couches, fissuration du bas vers le haut, fissuration partant du bas de la couche de base et remontant à la surface, et la fissuration thermique. Les détails pour la définition de ces caractéristiques est donné ultérieurement (Chapitre 6.4.2), ici uniquement les paramètres issus du modèle de comportement sont discutés. Dans la figure ci-après sont représentés les résultats pour les trois cas et pour les différentes performances évaluées (Fig. 6.16).

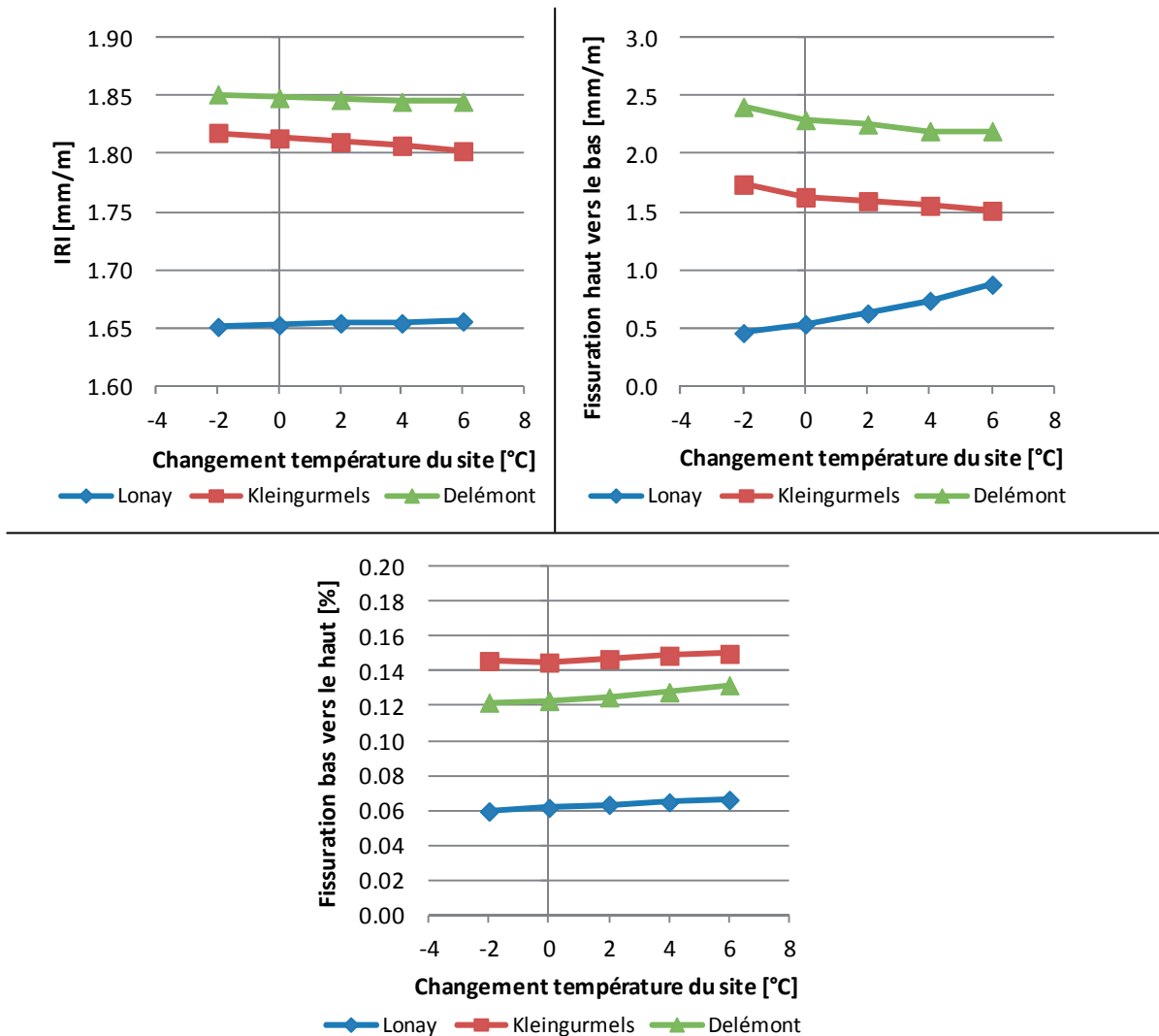


Fig. 6.16 – Méthode M-E PDG : Evolution de l'indice IRI (haut), de la fissuration longitudinale (gauche) et du faïençage (droite) par rapport au changement de température du site.

Le changement de température semble avoir une influence très faible sur les propriétés fonctionnelles des trois cas évalués. En effet des changements de l'indice IRI inférieurs à 1% peuvent être observés pour les trois cas quelque soit le scénario évalué. Les valeurs de l'indice se situent entre 1.7 mm/m (Lonay), 1.8 mm/m (Kleingurmels) et 1.9 mm/m (Delémont) pour les scénarios sans changement de température du site.

Concernant la fissuration du haut vers le bas, pour le cas de Lonay une augmentation de celle-ci peut être observée avec l'augmentation de la température du site. Par contre pour les cas de Kleingurmels et de Delémont une faible diminution de la fissuration est prévue. Notons que pour le cas de Lonay une très faible fissuration longitudinale est prévue (0.5 mm/m pour le scénario sans changement de température de base du site). Pour les deux autres cas les valeurs se situent entre 1.6 mm/m (Kleingurmels) et 2.3 mm/m (Delémont).

Concernant fissuration du bas vers le haut, des valeurs très faibles sont prévues (0.1 mm/m (Lonay), 0.2 mm/m (Kleingurmels) et 0.1 mm/m (Delémont)) ainsi que des variations très limitées (variation maximale de 7.5% pour une augmentation de +6°C de la température du site pour le cas de Lonay).

Pour les cas de Lonay et de Kleingurmels aucune fissuration thermique n'est relevée que ce soit pour le scénario de base sans changement de température ou pour les autres scénarios. Pour le cas de Delémont une très faible fissuration thermique (<0.1 mm/m) est observée pour le scénario de base sans changement de température et une légère augmentation de la fissuration est prédite pour le scénario -2°C (0.1 mm/m). La fissuration thermique semble être une caractéristique peu problématique pour les cas choisis.

### 6.2.7. Comparaison des résultats

L'évolution de la profondeur d'ornièrre relative par rapport au changement de température du site selon trois modèles de comportement (LAVOC, BRRC et M-E PDG) est représentée dans la figure ci-après (Fig. 6.17). Le modèle M-E PDG est divisé en deux parties, la première (M-E PDG (1) selon la figure) ne tient compte que de l'ornièrage des couches bitumineuses, alors que la deuxième (M-E PDG (2) selon la figure) tient compte de l'ornièrage total.

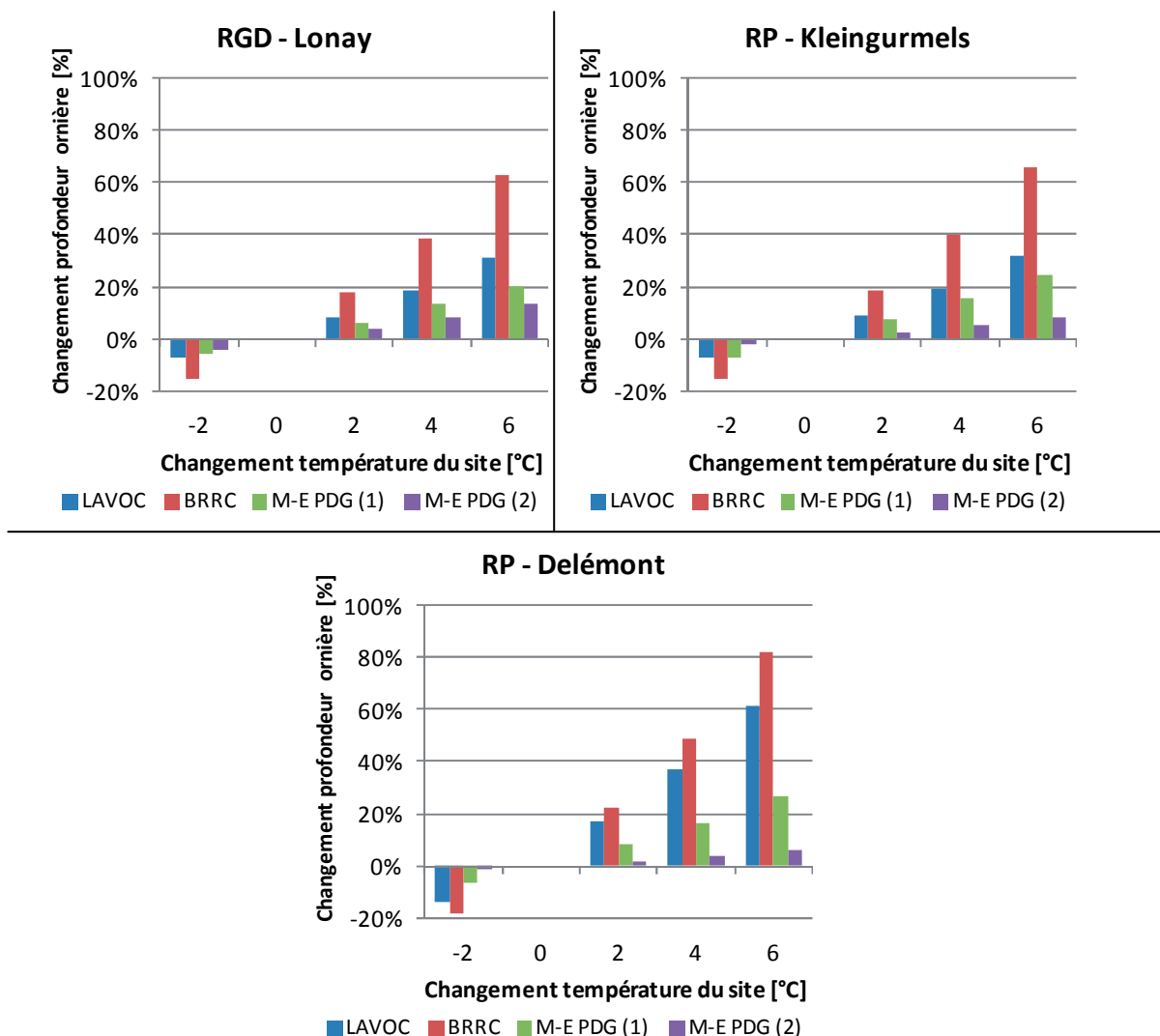


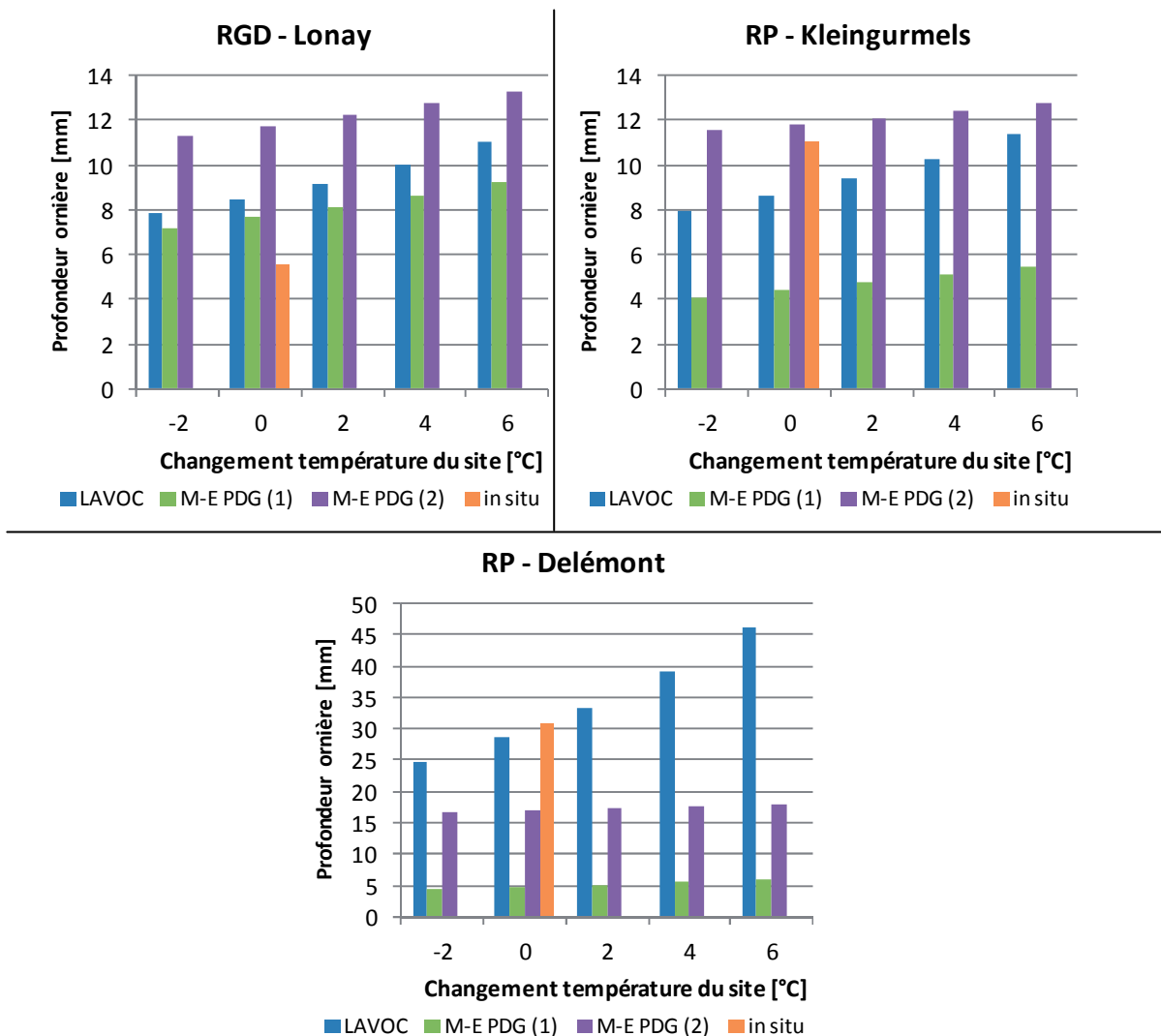
Fig. 6.17 – Evolution de la profondeur d'ornièrre relative par rapport au changement de température du site selon trois modèles.

De manière générale, le modèle BRRC indique des changements largement supérieurs aux deux autres modèles de comportement. Le modèle LAVOC indique pour sa part des changements intermédiaires et le modèle M-E PDG, pour l'ornièrage des couches bitumineuses et pour l'ornièrage total, des changements plus faibles. Les modèles de comportement LAVOC et BRRC ne sont basés que sur des considérations par rapport aux couches bitumineuses et ne prennent pas en



considération les caractéristiques des fondations et plateformes des revêtements évalués, d'où la difficulté de comparer ces résultats avec le modèle M-E PDG (2). Par contre la comparaison entre le modèle LAVOC et le modèle M-E PDG (1) montre que les résultats sont comparables pour le cas de Lonay et de Kleingurmels. Concernant le cas de Delémont, il s'agit d'un cas spécifique avec un orniérage in situ très marqué (30.8 mm). Le modèle M-E PDG se base pour le calcul des ornières de Delémont sur un nombre important d'hypothèses concernant les couches de fondation et la plateforme qui n'ont pas pu être vérifiées.

Pour les deux modèles de comportement LAVOC et M-E PDG, les profondeurs d'ornière absolues par rapport au changement de température du site ont pu être calculées. Celles-ci sont représentées dans la figure ci-après avec les ornières réelles, mesurées in situ (Fig. 6.18). Le modèle M-E PDG est de nouveau divisé en deux parties (M-E PDG (1) pour l'orniérage des couches bitumineuses et M-E PDG (2) pour l'orniérage total).



**Fig. 6.18** – Profondeur d'ornière absolue par rapport au changement de température du site selon deux modèles.

Pour les cas de Lonay et de Kleingurmels, l'orniérage total prédit par le modèle M-E PDG est légèrement supérieur au modèle LAVOC. Concernant le cas de Delémont, le modèle M-E PDG ne permet pas de prédire l'orniérage important mesuré in situ. Ce cas très spécifique nécessiterait l'analyse in situ des couches de fondation et de la plateforme afin de pouvoir inclure les données exactes dans le modèle M-E PDG.

Par rapport à la profondeur d'ornièrre réelle, mesurée in situ, le modèle LAVOC atteint une bonne corrélation, ce qui est logique étant donné que ce modèle est basé sur les mesures réelles de ces trois cas. Le modèle M-E PDG prédit un ornièrage très proche de l'ornièrage in situ pour le cas de Kleingurmels.

Le modèle M-E PDG étant le seul à s'intéresser à la structure routière complète (fondation, plateforme, structure bitumineuse), son utilisation est adaptée pour une analyse détaillée de l'impact du changement climatique sur des structures routières types (Chapitre 6.4).

### **6.3. Impact du changement climatique – Méthode de dimensionnement au gel suisse**

Les conditions météorologiques, et ainsi le phénomène de changement climatique, n'interviennent pas directement dans le dimensionnement des chaussées routières selon la méthode de dimensionnement suisse (SN 640 324b [114]). Uniquement le choix du grade de liant et le dimensionnement au gel des structures fait intervenir des considérations météorologiques. Pour ce dernier, un comportement au gel défavorable se solde par une adaptation des couches de grave (stabilisées), et n'influence donc en rien les couches de revêtements bitumineuses.

Comme décrit dans le Chapitre 2.4.3, les conditions météorologiques influencent tout particulièrement l'indice de gel de l'air, ce qui a des répercussions sur l'indice de gel de la route de même que sur la profondeur de pénétration du gel.

Dans ce chapitre, l'impact du changement climatique sur l'indice de gel de l'air est évalué afin de déterminer si une diminution de la profondeur de pénétration du gel peut être envisagée. Notons que dans le Chapitre 5 il a été montré qu'une diminution du nombre de cycles de gel-dégel est prévue pour toutes les régions climatiques évaluées. Il est donc fortement probable que cette baisse du nombre de cycles se traduit par une diminution du phénomène de gel-dégel et ainsi par des profondeurs de gel plus faibles.

Le chapitre est divisé en plusieurs parties : Chapitre 6.3.1 – Description des méthodes de calcul de l'indice de gel de l'air et de la profondeur de pénétration du gel ; Chapitre 6.3.2 – Hypothèses et paramètres d'analyse ; Chapitre 6.3.3 – Impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel des structures routières.

#### **6.3.1. Méthode de calcul de l'indice de gel de l'air et de la profondeur de pénétration du gel [143]**

La méthode de calcul de l'indice de gel de l'air est issue de la norme SN 670 140b (2001) [143]. L'indice de gel significatif de l'air (FI) est calculé selon la méthode de l'indice globale. Il s'agit donc de retracer la courbe cumulative des températures moyennes journalières de l'air pendant la période de gel, et d'en déterminer la différence entre le maximum et le minimum de cette courbe. Cette différence représente l'indice de gel de l'air (Fig. 6.19).

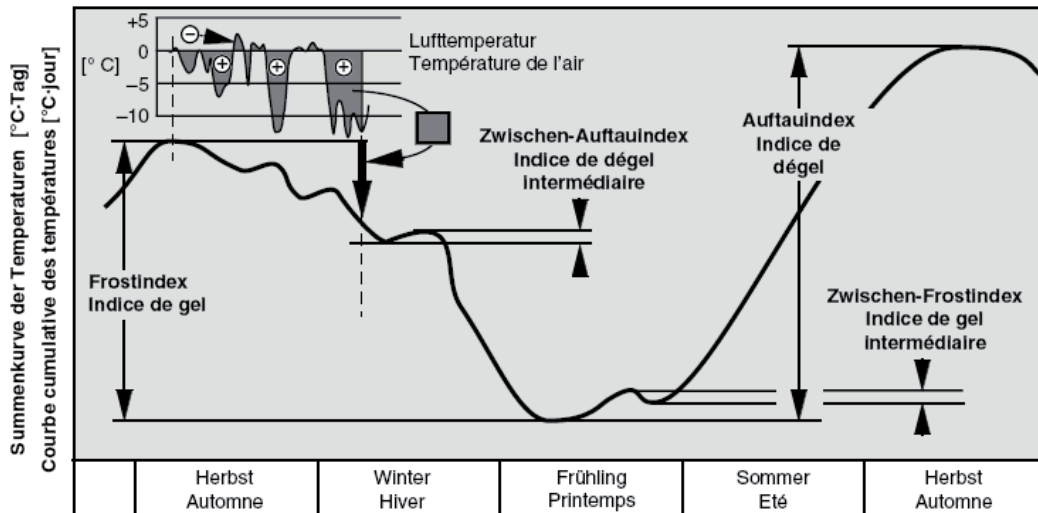


Fig. 6.19 –Définition graphique des indices de gel et de dégel [143].

Selon la norme SN 670 140b (2001) [143] l'indice de gel significatif de l'air (FI) correspond à la moyenne des indices de gel des trois hivers les plus froids des 30 dernières années. Dans le cadre de cette thèse, des hypothèses légèrement adaptées ont été appliquées (Chapitre 6.3.2).

Pour un site géographique donné, l'indice de gel de la route  $FI_s$  correspond à la différence entre l'indice de gel significatif de l'air et l'indice de radiation RI. L'indice de radiation permet d'introduire l'effet des radiations solaires dans le calcul de l'indice de gel d'une route, et ainsi tenir compte de l'effet d'ensoleillement d'un site géographique donné. L'indice varie entre 0°C-jour (ensoleillement journalier nul) et plus que 200°C-jour (ensoleillement fort). Il peut être déterminé à l'aide du diagramme donné dans la norme SN 670 140b (2001) [143] (Fig. 6.20).

|  |                                   |                  |                 |               |   |   |   |
|--|-----------------------------------|------------------|-----------------|---------------|---|---|---|
| <b>Strahlungsindex</b><br><b>Indice de radiation</b><br><br><b>RI</b><br>[° C·Tag]<br>[° C·jour] | 200                               |                  |                 |               |   |   |   |
|  | 150                               |                  |                 |               |   |   |   |
|  | 100                               |                  |                 |               |   |   |   |
|  | 50                                |                  |                 |               |   |   |   |
| <b>Tägliche Besonnung</b><br><b>Ensoleillement journalier</b>                                    | Null (angenommen)<br>Null (admis) | Leicht<br>Faible | Mittel<br>Moyen | Stark<br>Fort |   |   |   |
| <b>GH</b> [kWh·m <sup>-2</sup> ]   | 0,5                               | 1,0              | 1,5             | 2,0           |   |   |   |
| <b>GH</b> [MJ·m <sup>-2</sup> ]  | 1                                 | 2                | 3               | 4             | 5 | 6 | 7 |
| <b>Dauer</b> [Std]<br><b>Durée</b> [heure]   | 1                                 | 2                | 3               | 4             |   |   |   |

Fig. 6.20 –Indice de radiation en fonction de l'ensoleillement [143].

La profondeur de pénétration du gel est déterminée à l'aide de l'abaque donnée dans la norme SN 670 140b (2001) [143] (Fig. 6.21). L'abaque permet de déterminer les profondeurs de gel en fonction des indices de gel de la route, des caractéristiques du sol (degré de gélivité, masse volumique sèche, teneur en eau) et de l'épaisseur de dimensionnement des chaussées selon la méthode de dimensionnement suisse (SN 640 324b [114]).

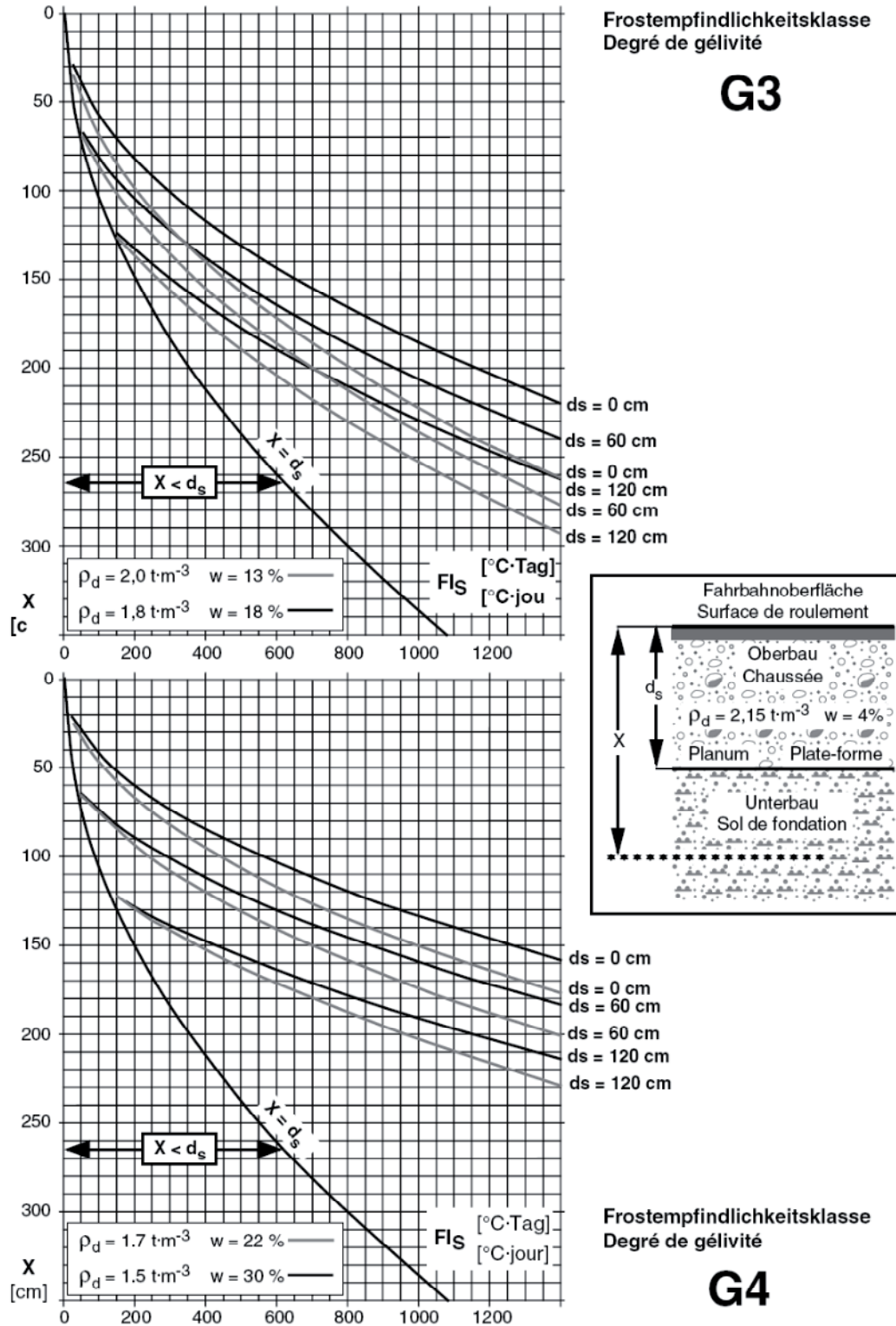


Fig. 6.21 – Profondeur de pénétration du gel en fonction de l'indice de gel de la route [143].

### 6.3.2. Hypothèses et paramètres d'analyse

Dans le cadre de cette thèse, l'indice de gel de l'air a été déterminé selon les données météorologiques issues du modèle climatique de pronostic Meteonorm 7.0. Plusieurs cas ont été évalués, présentant les paramètres et hypothèses suivants :

- Régions climatiques : Huit régions climatiques suisses présentant des caractéristiques climatiques différentes ont été évaluées (Jura, Bassin Lémanique, Plateau (ouest), Plateau (est), Préalpes, Valais, Grisons et Sud des Alpes). La région du Valais a en outre été divisée en deux parties : Haute altitude et vallée du Rhône. Les régions sont représentées par des sites géographiques spécifiques (Chapitre 5.1.2).
- Périodes d'analyse : Quatre périodes d'analyse sont évaluées (référence : chaussée réalisée en 1990, court-terme : réalisation en 2020, moyen-terme : réalisation en 2050 et long-terme : réalisation en 2080). Chaque période a une durée de 20 ans pour la définition de l'indice de gel de l'air, par exemple pour la période de référence la période 1990 à 2010 est prise en considération.
- Scénarios climatiques : Trois scénarios climatiques proposés par l'IPCC ont été évalués (scénario B1 - intégré et écologique, scénario A1B - intégré (balance énergies fossiles - non-fossiles) et scénario A2 - hétérogène) (Chapitre 5.1.1).
- Température moyenne journalière : La température moyenne journalière  $T_m$  correspond à la moyenne des températures horaires sur une journée (24 heures). La formule donnée dans la norme SN 670 140b (2001) [143] n'a pas été appliquée, car celle-ci ne correspond qu'à une approximation de la température moyenne journalière.
- Calcul de l'indice de gel significatif de l'air : Pour la période de référence la méthode de calcul traditionnelle issue de la norme SN 670 140b (2001) [143] a été appliquée (moyenne des indices de gel des trois hivers les plus froids des 30 dernières années (1960 à 1990)). Pour les trois autres périodes, l'indice de gel significatif de l'air a été déterminé selon les données météorologiques issues de Meteonorm 7.0 pour la période en question. Ainsi, par exemple pour l'indice FI de la période à court-terme, le calcul est basé sur l'évaluation des données météorologiques de la période 2020 à 2040.

Pour évaluer la diminution de la profondeur de pénétration du gel, plusieurs cas ont été modélisés. Les caractéristiques prises en considération pour cette évaluation sont les suivantes :

- Degré de gélivité des sols : Sols moyennement gélifs (degré G3) et sols fortement gélifs (degré G4).
- Indice de radiation : Indice de radiation fort ( $RI=200^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$ ), indice moyen ( $RI=100^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$ ) et indice nul ( $RI=0^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$ ).
- Caractéristiques du sol : Sol avec une masse volumique sèche  $\rho_d$  de  $2.0 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  et une teneur en eau  $w$  de 13% pour les sols G3 ; Sol avec une masse volumique sèche  $\rho_d$  de  $1.7 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$  et une teneur en eau  $w$  de 22% pour les sols G4.
- Caractéristiques des structures routières : Chaussée routière avec une épaisseur de 60 cm. Facteur de dimensionnement  $f$  de 0.45 et 0.55 pour les sols G3 ; Facteur de dimensionnement  $f$  de 0.55 et 0.65 pour les sols G4.
- Profondeur de gel : Profondeur de pénétration du gel  $X_{30}$  déterminée à l'aide de l'abaque donnée dans la norme SN 670 140b [143].

### 6.3.3. Impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel des structures routières

L'impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel des structures routières suisses est évalué par l'impact sur l'indice de gel significatif de l'air (Chapitre 6.3.3.1), par l'impact sur les profondeurs de gel correspondantes (Chapitre 6.3.3.2) et par l'impact sur les épaisseurs nécessaires des chaussées pour lutter contre le phénomène de gel (Chapitre 6.3.3.3). A la fin de ce chapitre, des conclusions sont tirées et des recommandations faites (Chapitre 6.3.3.4).

#### 6.3.3.1. Impact du changement climatique sur l'indice de gel significatif de l'air

Les indices de gel significatif de l'air actuellement utilisés pour le dimensionnement au gel des structures routières suisses peuvent être déterminés selon la norme SN 670 140b [143]. Pour les neuf régions climatiques suisses évaluées, ces indices sont donnés par les intervalles suivants (Fig. 6.22) :

- Jura : FI = 400 à 600°C·jour pour le site de La Chaux-de-Fonds.
- Bassin Lémanique : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Lausanne.
- Plateau (ouest) : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Berne.
- Plateau (est) : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Zurich.
- Préalpes : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Altdorf.
- Valais (haute altitude) : FI = 800 à 1000°C·jour pour le site du Simplon.
- Valais (vallée du Rhône) : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Sion.
- Grisons FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Coire.
- Sud des Alpes : FI = 200 à 400°C·jour pour le site de Lugano.

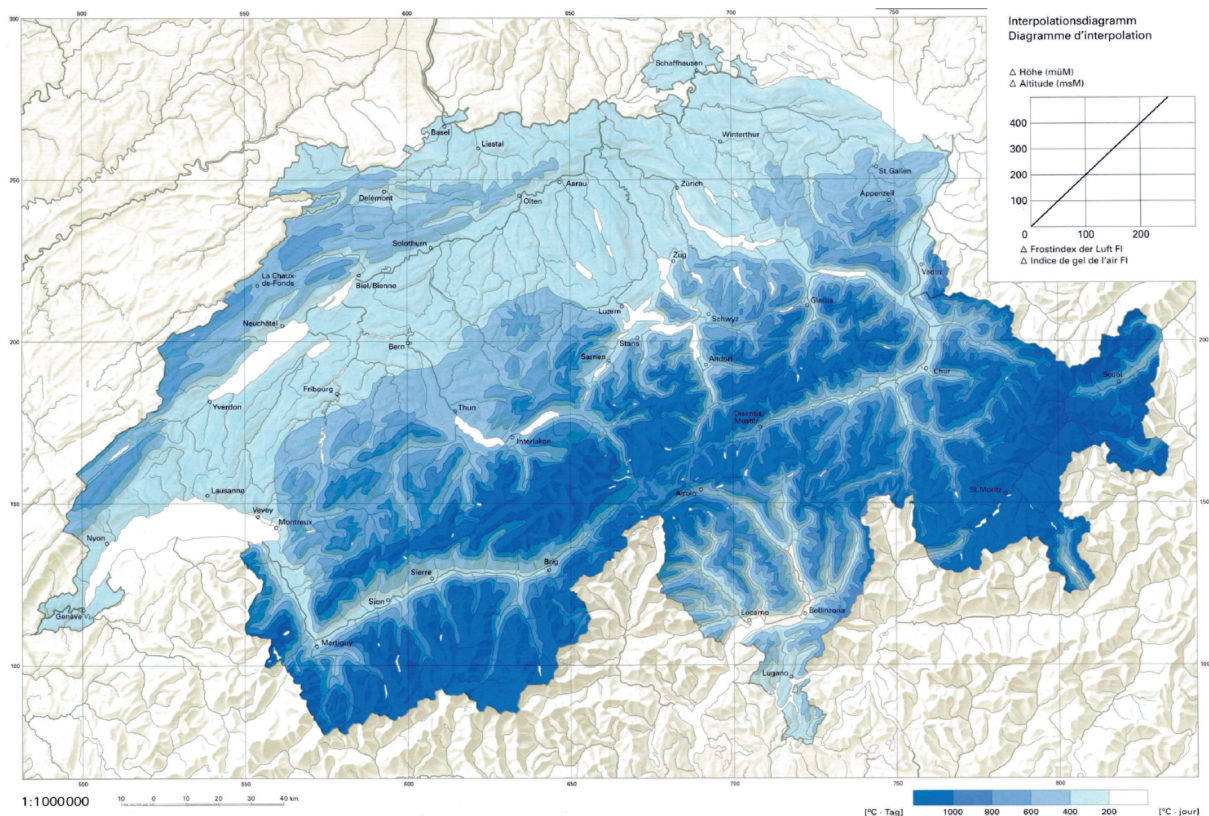


Fig. 6.22 – Indice de gel significatif de l'air en Suisse selon la norme SN 670 140b [143].



L'utilisation des prévisions climatiques pour les différentes régions montre des changements radicaux de l'indice de gel significatif de l'air dans le futur (Tab. 6.5).

| Période d'analyse        | Scénario climatique | Jura    | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|--------------------------|---------------------|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| <b>SN 670 140b [143]</b> |                     | 400-600 | 200-400          | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 800-1000                | 200-400 | 200-400       |
| <b>Référence</b>         |                     | 586     | 258              | 379             | 363           | 318      | 386                      | 878                     | 385     | 116           |
| <b>Court-terme</b>       | <b>B1</b>           | 468     | 188              | 292             | 278           | 237      | 302                      | 706                     | 304     | 68            |
|                          | <b>A1B</b>          | 450     | 178              | 278             | 267           | 220      | 280                      | 679                     | 293     | 61            |
|                          | <b>A2</b>           | 459     | 188              | 284             | 277           | 225      | 289                      | 690                     | 289     | 59            |
| <b>Moyen-terme</b>       | <b>B1</b>           | 411     | 163              | 251             | 242           | 188      | 256                      | 636                     | 257     | 48            |
|                          | <b>A1B</b>          | 360     | 120              | 202             | 192           | 150      | 211                      | 550                     | 211     | 31            |
|                          | <b>A2</b>           | 364     | 131              | 211             | 199           | 155      | 219                      | 557                     | 220     | 32            |
| <b>Long-terme</b>        | <b>B1</b>           | 372     | 136              | 228             | 205           | 163      | 225                      | 573                     | 228     | 35            |
|                          | <b>A1B</b>          | 301     | 90               | 161             | 144           | 114      | 161                      | 457                     | 165     | 19            |
|                          | <b>A2</b>           | 278     | 88               | 150             | 134           | 106      | 148                      | 429                     | 149     | 20            |

**Tab. 6.5** – Indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques [°C·jour].

Les indices de gel significatifs déterminés pour la période de référence (1990-2010) correspondent aux intervalles des indices indiqués dans la norme SN 670 140b [143], à l'exception de la région du Sud des Alpes. Pour cette dernière un indice de 116°C·jour est calculé, légèrement en-dessous de l'intervalle donné dans la norme qui est de 200 à 400°C·jour.

La diminution de l'indice de gel significatif de l'air touche toutes les régions climatiques et s'accroît avec la période d'analyse. La figure ci-après (Fig. 6.23) montre un exemple de l'évolution d'un hiver représentatif pour la région du Valais à haute altitude pour la période de référence, ainsi que pour les trois périodes d'analyse (scénario climatique moyen – A1B). L'on peut constater la diminution marquée de la période de gel, avec des températures passant moins souvent sous la barre des 0°C, et provoquant ainsi des diminutions moins marquées des courbes cumulatives des températures lors de la saison hivernale.

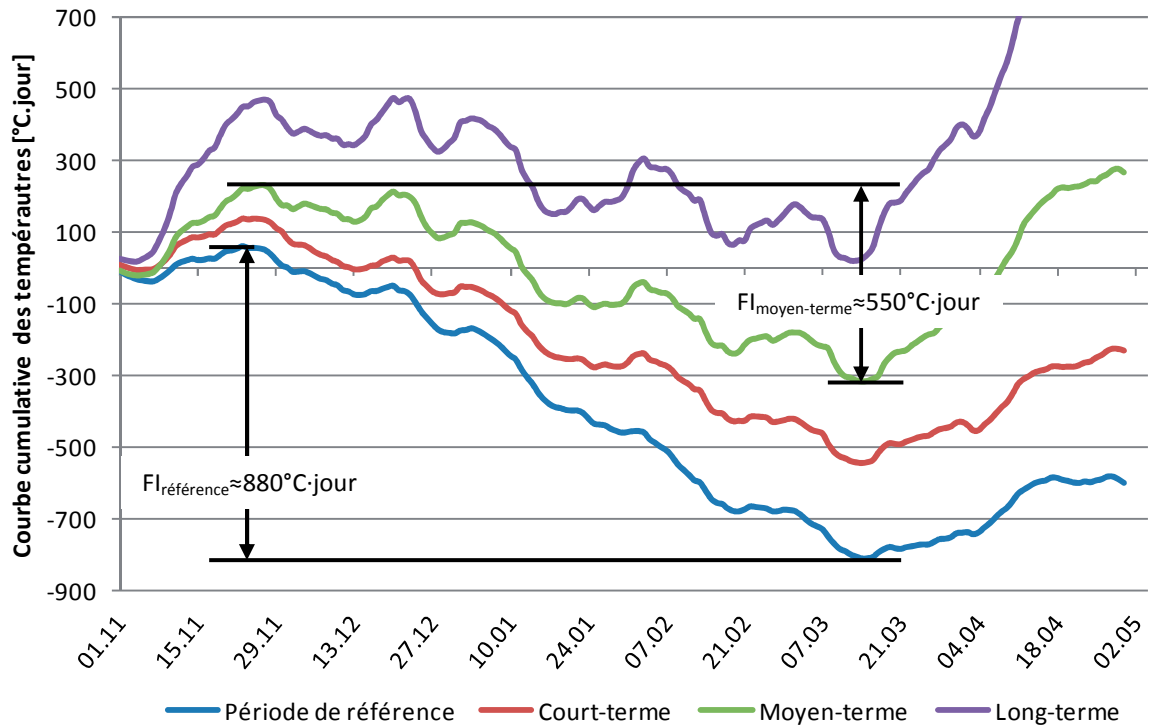


Fig. 6.23 – Courbe cumulative des températures et indice de gel significatif de l'air pour la région du Valais à haute altitude et pour différentes périodes d'analyse (scénario climatique A1B).

La diminution de l'indice de gel de l'air est maximale pour la période à long-terme, mais elle peut être importante pour la période à court-terme déjà. Ainsi pour le scénario climatique moyen (scénario A1B), des diminutions de l'indice entre 20 et 50% sont observées pour le court-terme, et des diminutions entre 50 et 85% sont observés pour le long-terme. Les diminutions relatives maximales sont observées pour la région du Sud des Alpes, et les diminutions relatives minimales pour la région du Jura et du Valais à haute altitude (Fig. 6.24). Les valeurs du changement relatif de l'indice dépendent fortement de la valeur de référence de FI.

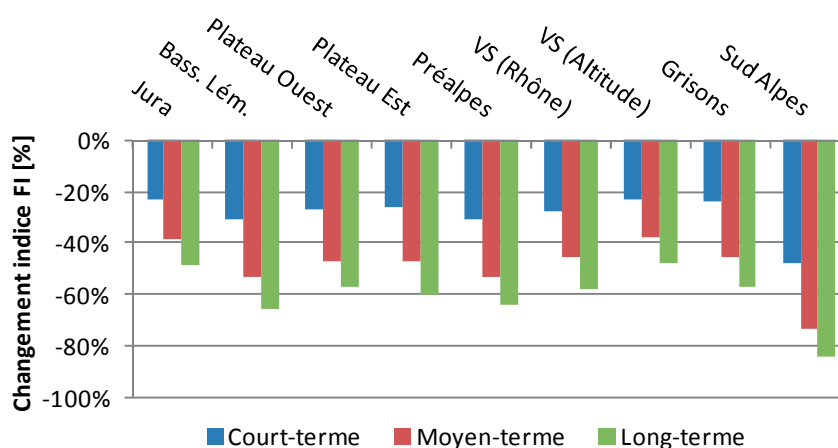
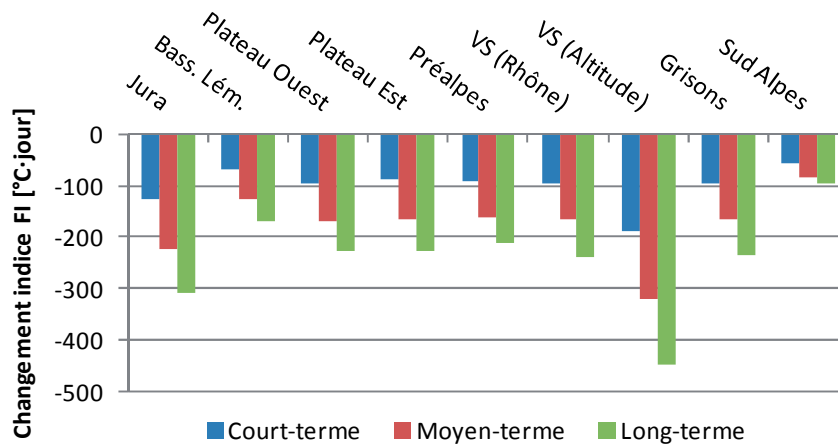


Fig. 6.24 – Changement relatif de l'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (scénario climatique A1B).



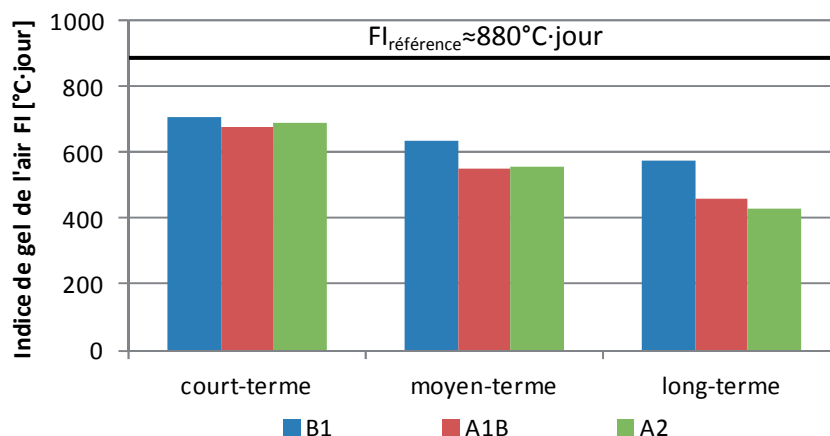
Les diminutions en valeurs absolues de l'indice de gel de l'air sont maximales pour les régions du Jura et du Valais à haute altitude. Ainsi à court-terme et pour le scénario climatique moyen (scénario A1B) une diminution absolue de 199°C·jour est observée pour le site du Simplon (Valais à haute altitude) et une diminution de 136°C·jour pour le site de La Chaux-de-Fonds (Jura). A long-terme ces diminutions sont de 285°C·jour pour le Jura et 421°C·jour pour le Valais à haute altitude. Les diminutions absolues minimales de l'indice de gel de l'air sont observées pour la région du Sud des Alpes (-56°C·jour à court-terme et -98°C·jour à long-terme) (Fig. 6.25).



**Fig. 6.25** – Changement absolu de l'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (scénario climatique A2).

La différence entre les indices de gel de l'air calculés pour les trois scénarios climatiques peut être très importante. Les diminutions de l'indice sont toujours plus élevées pour les scénarios A1B et A2, avec des valeurs très proches entre ces deux cas. Le scénario B1 présente par contre des diminutions plus faibles. Les différences relatives entre les scénarios extrêmes B1 et A2 peuvent atteindre les 13% à court-terme et les 46% à long-terme (région du Sud des Alpes). Ainsi les différences entre les scénarios augmentent avec la période d'analyse.

En valeurs absolues les différences peuvent atteindre 27°C·jour à court-terme et 144°C·jour à long-terme (région du Valais à haute altitude) (Fig. 6.26).



**Fig. 6.26** – Indice de gel significatif de l'air pour les différents scénarios climatiques et périodes d'analyse (région climatique du Valais à haute altitude).

La diminution de l'indice de gel de l'air pour les différentes régions climatiques peut également s'observer à travers le changement des catégories de l'indice selon la norme SN 670 140b [143]. Ainsi

toutes les régions évaluées présentent au moins un cas où la catégorie de l'indice risque de changer d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Tab. 6.6).

| Période d'analyse | Scénario climatique | Jura    | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|-------------------|---------------------|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| SN 670 140b [143] |                     | 400-600 | 200-400          | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 800-1000                | 200-400 | 200-400       |
| Référence         |                     | 400-600 | 200-400          | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 800-1000                | 200-400 | 0-200         |
| Court-terme       | B1                  | 400-600 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 600-800                 | 200-400 | 0-200         |
|                   | A1B                 | 400-600 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 600-800                 | 200-400 | 0-200         |
|                   | A2                  | 400-600 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 600-800                 | 200-400 | 0-200         |
| Moyen-terme       | B1                  | 400-600 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 0-200    | 200-400                  | 600-800                 | 200-400 | 0-200         |
|                   | A1B                 | 200-400 | 0-200            | 200-400         | 0-200         | 0-200    | 200-400                  | 400-600                 | 200-400 | 0-200         |
|                   | A2                  | 200-400 | 0-200            | 200-400         | 0-200         | 0-200    | 200-400                  | 400-600                 | 200-400 | 0-200         |
| Long-terme        | B1                  | 200-400 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 0-200    | 200-400                  | 400-600                 | 200-400 | 0-200         |
|                   | A1B                 | 200-400 | 0-200            | 0-200           | 0-200         | 0-200    | 0-200                    | 400-600                 | 0-200   | 0-200         |
|                   | A2                  | 200-400 | 0-200            | 0-200           | 0-200         | 0-200    | 0-200                    | 400-600                 | 0-200   | 0-200         |

Tab. 6.6 – Catégorie d'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques [°C·jour].

Les régions climatiques du Bassin Lémanique et du Sud des Alpes atteignent la catégorie d'indice de gel de l'air la plus basse pour la période à court-terme déjà. D'autres régions risquent d'atteindre cette catégorie à moyen-terme (Préalpes, Plateau Est) ou à long-terme (Plateau Ouest, Valais – Vallée du Rhône, Grisons). Uniquement les régions du Jura et du Valais à haute altitude restent toujours dans des catégories plus élevées. Il y a donc cinq grandes régions qui ressortent de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les indices de gel significatifs de l'air.

## 6.3.3.2. Impact du changement climatique sur la profondeur de pénétration du gel

L'impact du changement climatique sur les indices de gel significatifs de l'air a également un impact sur les profondeurs de pénétration du gel correspondantes. Un aperçu des différentes profondeurs de gel déterminées est donné dans les tableaux ci-après (Tab. 6.7 et Tab. 6.8). Les résultats détaillés peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.2).

| Période d'analyse   | Scénario climatique | Jura    | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|---|---------------------|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| <b>Sol de gélivité G3 ; Indice de radiation RI=0°C-jour</b>   |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 155-186 | 113-155          | 113-155         | 113-155       | 113-155  | 113-155                  | 212-236                 | 113-155 | 113-155       |
|   | Référence           | 184     | 127              | 223             | 149           | 140      | 152                      | 223                     | 152     | 90            |
| Court-terme   | B1                  | 166     | 110              | 135             | 132           | 122      | 135                      | 200                     | 135     | 77            |
|   | A1B                 | 162     | 109              | 132             | 129           | 118      | 132                      | 200                     | 135     | 73            |
|   | A2                  | 165     | 110              | 133             | 131           | 120      | 133                      | 200                     | 133     | 72            |
| Moyen-terme   | B1                  | 158     | 102              | 125             | 124           | 110      | 127                      | 190                     | 127     | <70           |
|   | A1B                 | 148     | 92               | 114             | 112           | 101      | 117                      | 178                     | 117     | <70           |
|   | A2                  | 149     | 97               | 117             | 113           | 102      | 118                      | 180                     | 118     | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 150     | 98               | 121             | 114           | 103      | 120                      | 182                     | 121     | <70           |
|   | A1B                 | 135     | 83               | 102             | 99            | 90       | 102                      | 165                     | 108     | <70           |
|   | A2                  | 131     | 82               | 101             | 97            | 88       | 100                      | 160                     | 100     | <70           |
| <b>Sol de gélivité G3 ; Indice de radiation RI=100°C-jour</b> |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 135-171 | 84-135           | 84-135          | 84-135        | 84-135   | 84-135                   | 200-224                 | 84-135  | 84-135        |
|   | Référence           | 170     | 102              | 131             | 129           | 118      | 134                      | 210                     | 134     | <70           |
| Court-terme   | B1                  | 149     | 82               | 112             | 109           | 98       | 114                      | 188                     | 114     | <70           |
|   | A1B                 | 145     | 78               | 109             | 108           | 94       | 109                      | 183                     | 112     | <70           |
|   | A2                  | 147     | 82               | 110             | 109           | 95       | 111                      | 184                     | 111     | <70           |
| Moyen-terme   | B1                  | 139     | 73               | 101             | 99            | 82       | 102                      | 177                     | 102     | <70           |
|   | A1B                 | 127     | <70              | 87              | 83            | <70      | 89                       | 163                     | 89      | <70           |
|   | A2                  | 129     | <70              | 89              | 85            | 72       | 94                       | 165                     | 93      | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 130     | <70              | 97              | 88            | 73       | 95                       | 168                     | 97      | <70           |
|   | A1B                 | 114     | <70              | 73              | <70           | <70      | 73                       | 147                     | 73      | <70           |
|   | A2                  | 109     | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 143                     | <70     | <70           |
| <b>Sol de gélivité G3 ; Indice de radiation RI=200°C-jour</b> |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 113-155 | 0-113            | 0-113           | 0-113         | 0-113    | 0-113                    | 186-212                 | 0-113   | 0-113         |
|   | Référence           | 153     | 73               | 109             | 103           | 94       | 110                      | 200                     | 110     | <70           |
| Court-terme   | B1                  | 129     | <70              | 83              | 78            | <70      | 87                       | 172                     | 87      | <70           |
|   | A1B                 | 125     | <70              | 78              | 73            | <70      | 78                       | 168                     | 83      | <70           |
|   | A2                  | 127     | <70              | 81              | 78            | <70      | 82                       | 170                     | 82      | <70           |
| Moyen-terme   | B1                  | 117     | <70              | <70             | <70           | <70      | 72                       | 160                     | 72      | <70           |
|   | A1B                 | 101     | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 145                     | <70     | <70           |
|   | A2                  | 102     | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 147                     | <70     | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 106     | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 150                     | <70     | <70           |
|   | A1B                 | 87      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 217                     | <70     | <70           |
|   | A2                  | 78      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 121                     | <70     | <70           |

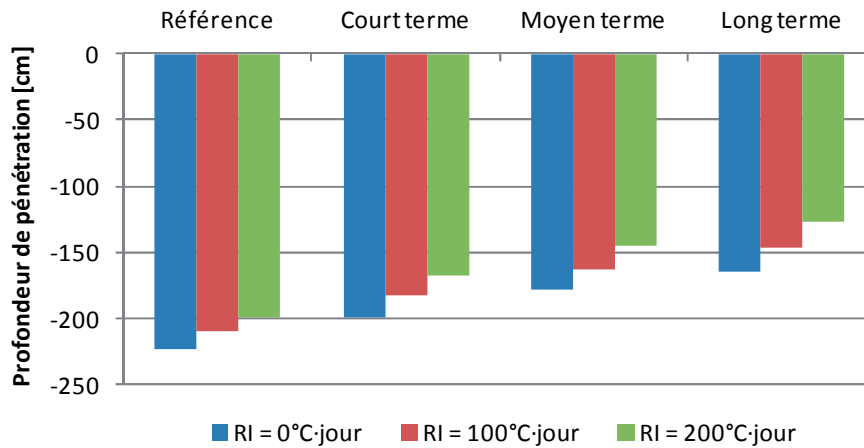
Tab. 6.7 – Profondeur de pénétration du gel pour les sols de gélivité G3 et pour les différentes régions climatiques [cm].

| Période d'analyse   | Scénario climatique | Jura    | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|---|---------------------|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| <b>Sol de gélivité G4 ; Indice de radiation RI=0°C·jour</b>   |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 120-140 | 93-120           | 93-120          | 93-120        | 93-120   | 93-120                   | 158-173                 | 93-120  | 93-120        |
| Référence   |                     | 139     | 103              | 118             | 117           | 110      | 119                      | 165                     | 119     | 78            |
| Court-terme   | B1                  | 128     | 92               | 108             | 107           | 99       | 109                      | 150                     | 109     | <70           |
|   | A1B                 | 125     | 90               | 107             | 104           | 98       | 107                      | 148                     | 108     | <70           |
|   | A2                  | 126     | 92               | 107             | 107           | 98       | 108                      | 149                     | 108     | <70           |
| Moyen-terme   | B1                  | 121     | 88               | 101             | 100           | 92       | 103                      | 143                     | 103     | <70           |
|   | A1B                 | 116     | 79               | 94              | 93            | 84       | 96                       | 135                     | 96      | <70           |
|   | A2                  | 117     | 81               | 96              | 94            | 85       | 98                       | 136                     | 98      | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 118     | 82               | 99              | 96            | 87       | 98                       | 138                     | 99      | <70           |
|   | A1B                 | 109     | 72               | 87              | 83            | 78       | 87                       | 127                     | 88      | <70           |
|   | A2                  | 107     | 72               | 84              | 82            | 76       | 84                       | 123                     | 84      | <70           |
| <b>Sol de gélivité G4 ; Indice de radiation RI=100°C·jour</b> |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 108-130 | 74-108           | 74-108          | 74-108        | 74-108   | 74-108                   | 150-166                 | 74-108  | 74-108        |
| Référence   |                     | 129     | 86               | 107             | 104           | 98       | 108                      | 156                     | 108     | <70           |
| Court-terme   | B1                  | 117     | 72               | 93              | 90            | 82       | 94                       | 142                     | 94      | <70           |
|   | A1B                 | 114     | <70              | 90              | 88            | 79       | 90                       | 138                     | 93      | <70           |
|   | A2                  | 115     | <70              | 92              | 90            | 80       | 93                       | 140                     | 93      | <70           |
| Moyen-terme   | B1                  | 110     | <70              | 84              | 83            | 72       | 85                       | 133                     | 85      | <70           |
|   | A1B                 | 103     | <70              | 75              | 72            | <70      | 77                       | 127                     | 77      | <70           |
|   | A2                  | 104     | <70              | 77              | 74            | <70      | 79                       | 127                     | 79      | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 106     | <70              | 81              | 75            | <70      | 80                       | 128                     | 81      | <70           |
|   | A1B                 | 94      | <70              | 73              | <70           | <70      | <70                      | 115                     | <70     | <70           |
|   | A2                  | 90      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 111                     | <70     | <70           |
| <b>Sol de gélivité G4 ; Indice de radiation RI=200°C·jour</b> |                     |         |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]   |                     | 93-120  | 0-93             | 0-93            | 0-93          | 0-93     | 0-93                     | 140-158                 | 0-93    | 0-93          |
| Référence   |                     | 119     | <70              | 90              | 88            | 79       | 92                       | 148                     | 92      | <70           |
| Court-terme   | B1                  | 104     | <70              | 72              | 70            | <70      | 75                       | 131                     | 75      | <70           |
|   | A1B                 | 101     | <70              | 70              | <70           | <70      | 70                       | 128                     | 72      | <70           |
|   | A2                  | 103     | <70              | 71              | <70           | <70      | 72                       | 129                     | 72      | <70           |
| Moyen-terme   | B1                  | 96      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 124                     | <70     | <70           |
|   | A1B                 | 87      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 114                     | <70     | <70           |
|   | A2                  | 88      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 115                     | <70     | <70           |
| Long-terme  | B1                  | 89      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 118                     | <70     | <70           |
|   | A1B                 | 75      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 103                     | <70     | <70           |
|   | A2                  | 70      | <70              | <70             | <70           | <70      | <70                      | 99                      | <70     | <70           |

Tab. 6.8 – Profondeur de pénétration du gel pour les sols de gélivité G4 et pour les différentes régions climatiques [cm].

Une diminution de la profondeur de pénétration du gel pour les différentes périodes d'analyse peut être observée. Celle-ci peut par exemple dépasser les 50% pour un degré de gélivité G3 et un indice de radiation nul (cas de Plateau Ouest).

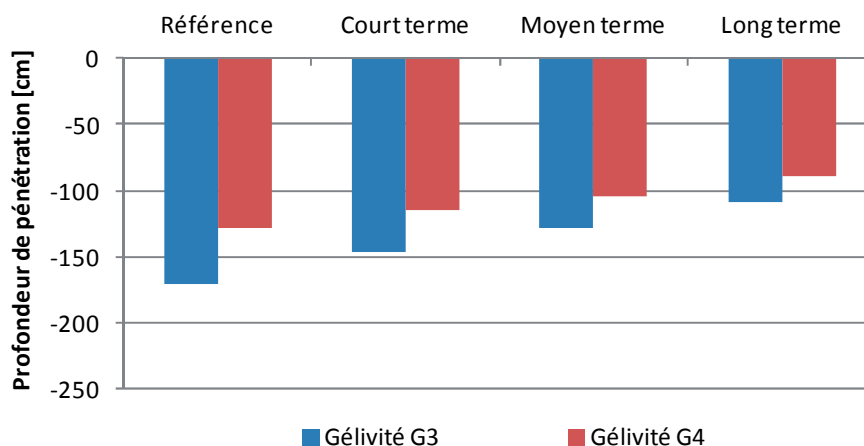
Les régions du Jura et du Valais à haute altitude sont les seules à présenter des valeurs de profondeur de pénétration exploitables pour tous les indices de radiation évalués. Les profondeurs de pénétration sont toujours plus élevées pour les indices de radiation faibles et cette différence a tendance à être plus marquée à long-terme (Fig. 6.27).



**Fig. 6.27** – Profondeur de pénétration du gel pour les différents indices de radiation et périodes d'analyse (degré de gélivité G3 ; région climatique du Valais à haute altitude ; scénario climatique A1B).

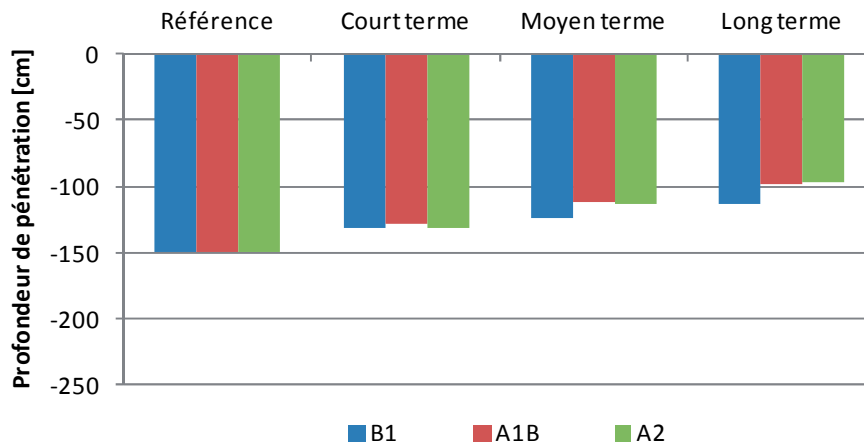
Les autres régions présentent plusieurs cas où la profondeur de pénétration du gel ne peut plus être déterminée à l'aide de l'abaque donnée dans la norme SN 670 140b (2001) [143] (Fig. 6.21) à cause d'indices de gel de la route trop faibles. La région du Sud des Alpes ne présente par exemple que très peu de cas où la profondeur de pénétration du gel dépasse les 70 cm (sols de degré de gélivité G3 ou G4 avec indice de radiation nul).

La différence entre les sols de degré de gélivité G3 et G4 n'est pas négligeable. Les profondeurs sont toujours plus élevées pour les sols de degré G3, mais la différence a tendance à diminuer sur le long-terme (Fig. 6.28).



**Fig. 6.28** – Profondeur de pénétration du gel pour les différents degrés de gélivité du sol et périodes d'analyse (région climatique du Jura ; indice de radiation nul ; scénario climatique A2).

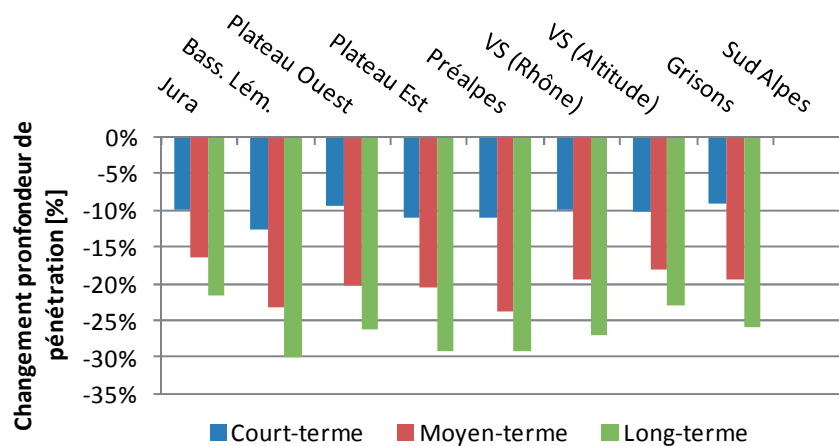
Les profondeurs de pénétration du gel montrent très peu de différences entre les scénarios climatiques A1B et A2, par contre le scénario B1 présente toujours des profondeurs plus élevées. La différence entre les scénarios climatiques augmente dans le temps (Fig. 6.29).



**Fig. 6.29** – Profondeur de pénétration du gel pour les différents scénarios climatiques et périodes d'analyse (région climatique Plateau Est ; indice de radiation nul ; degré de gélivité G3).

La région climatique du Sud des Alpes présente les profondeurs de pénétration du gel les plus faibles, suivi de la région du Bassin Lémanique. La région du Jura et surtout la région du Valais à haute altitude présentent toujours les profondeurs de pénétration les plus élevées. Les autres régions se situent entre ces deux groupes extrêmes.

La diminution relative de la profondeur de pénétration du gel est plus faible pour les régions du Jura et du Valais à haute altitude. Les autres régions présentent des diminutions semblables (Fig. 6.30).



**Fig. 6.30** – Changement relatif des profondeurs de pénétration du gel pour les différentes régions climatiques et périodes d'analyse (indice de radiation nul ; degré de gélivité G4 ; scénario climatique A1B).

### 6.3.3.3. Impact du changement climatique sur les épaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

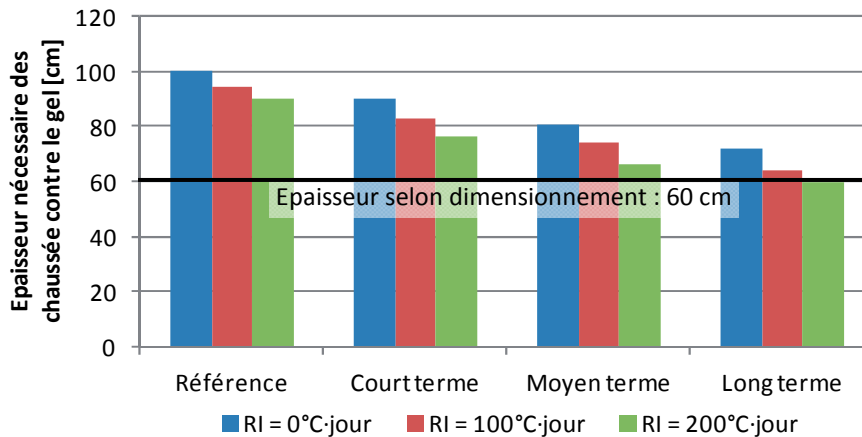
Le passage entre la profondeur de pénétration et les épaisseurs nécessaires des chaussées pour résister au gel se fait par l'application d'un facteur de dimensionnement. Ce facteur dépend d'une part du degré de gélivité du sol (le facteur est toujours plus faible pour le degré G3) et de l'indice de gel de la route (le facteur est divisé en trois catégories et augmente d'une catégorie à une autre :  $FI_s < 400^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$  ;  $400^\circ\text{C}\cdot\text{jour} \leq FI_s \leq 600^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$  ;  $FI_s > 600^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$ ). Le facteur fait intervenir une notion de risque associé à l'acceptation qu'une profondeur de pénétration du gel soit supérieure à l'épaisseur des différentes couches composant une chaussée routière.

Dans le cadre de cette thèse, un facteur de dimensionnement  $f$  de 0.45 et 0.55 pour les sols G3, et un facteur de 0.55 et 0.65 pour les sols G4, a été appliqué à tous les cas évalués. Dans le tableau ci-après est donné un exemple du calcul des épaisseurs nécessaires contre le gel des chaussées pour le cas d'un sol de degré de gélivité G3 et d'un indice de radiation nul (Tab. 6.9). Les cases maquées en vert dans le tableau représentent les cas où le dimensionnement au gel n'est pas contraignant. Les résultats détaillés de tous les cas évalués peuvent être consultés en annexe (Annexes 10.2.3 et 10.2.4).

| Période d'analyse                                       | Scénario climatique | Jura   | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|---|---------------------|--------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| <b>Facteur de dimensionnement <math>f = 0.45</math></b> |                     |        |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]                                       |                     | 70-84  | 51-70            | 51-70           | 51-70         | 51-70    | 51-70                    | 95-106                  | 51-70   | 51-70         |
| Référence   |                     | 83     | <60              | 100             | 67            | 63       | 68                       | 100                     | 68      | <60           |
| Court-terme   | B1                  | 75     | <60              | 61              | <60           | <60      | 61                       | 90                      | 61      | <60           |
|   | A1B                 | 73     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 90                      | 61      | <60           |
|   | A2                  | 74     | <60              | 60              | <60           | <60      | 60                       | 90                      | 60      | <60           |
| Moyen-terme   | B1                  | 71     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 86                      | <60     | <60           |
|   | A1B                 | 67     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 80                      | <60     | <60           |
|   | A2                  | 67     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 81                      | <60     | <60           |
| Long-terme  | B1                  | 68     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 82                      | <60     | <60           |
|   | A1B                 | 61     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 74                      | <60     | <60           |
|   | A2                  | <60    | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 72                      | <60     | <60           |
| <b>Facteur de dimensionnement <math>f = 0.55</math></b> |                     |        |                  |                 |               |          |                          |                         |         |               |
| SN 670 140b [143]                                       |                     | 85-102 | 62-85            | 62-85           | 62-85         | 62-85    | 62-85                    | 117-130                 | 62-85   | 62-85         |
| Référence   |                     | 101    | 70               | 123             | 82            | 77       | 84                       | 123                     | 84      | <60           |
| Court-terme   | B1                  | 91     | 61               | 74              | 73            | 67       | 74                       | 110                     | 74      | <60           |
|   | A1B                 | 89     | 60               | 73              | 71            | 65       | 73                       | 110                     | 74      | <60           |
|   | A2                  | 91     | 61               | 73              | 72            | 66       | 73                       | 110                     | 73      | <60           |
| Moyen-terme   | B1                  | 87     | <60              | 69              | 68            | 61       | 70                       | 105                     | 70      | <60           |
|   | A1B                 | 81     | <60              | 63              | 62            | <60      | 64                       | 98                      | 64      | <60           |
|   | A2                  | 82     | <60              | 64              | 62            | <60      | 65                       | 99                      | 65      | <60           |
| Long-terme  | B1                  | 83     | <60              | 67              | 63            | <60      | 66                       | 100                     | 67      | <60           |
|   | A1B                 | 74     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 91                      | <60     | <60           |
|   | A2                  | 72     | <60              | <60             | <60           | <60      | <60                      | 88                      | <60     | <60           |

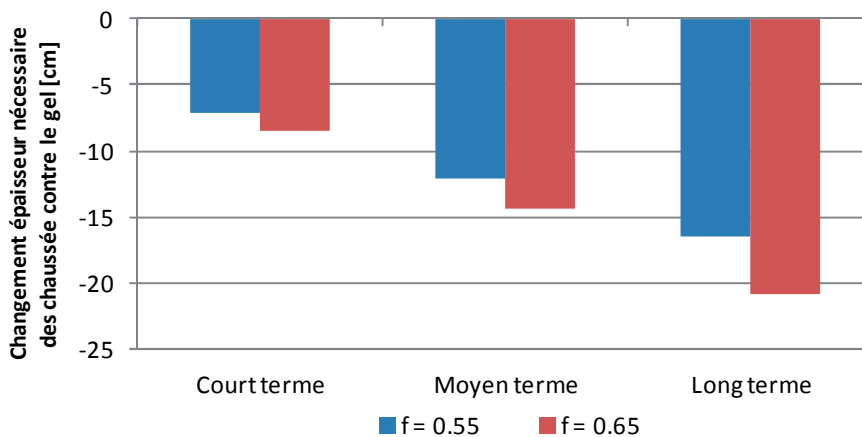
**Tab. 6.9** – Epaisseurs des chaussées nécessaires contre le gel de pénétration du gel pour un sol de gélivité G3, un indice de radiation nul et pour les différentes régions climatiques [cm].

Les épaisseurs nécessaires des chaussées à mettre en place pour lutter contre le phénomène de gel présentent des caractéristiques identiques au changement des profondeurs de pénétration du gel. Ainsi les épaisseurs nécessaires diminuent fortement avec le temps et présentent des disparités régionales importantes. Par exemple la région du Sud des Alpes ne présente aucun cas où un dimensionnement au gel est nécessaire. Par contre la région du Valais à haute altitude ne présente que de très rares cas et uniquement à long-terme où un dimensionnement au gel n'est plus nécessaire (Fig. 6.31).



**Fig. 6.31** – Epaisseur nécessaire des chaussées contre le gel pour les différents indices de radiation et périodes d'analyse (degré de gélivité G3 ; région climatique du Valais à haute altitude ; scénario climatique A2 ;  $f = 0.45$ ).

La région du Jura nécessite également pour la plupart des cas évalués une adaptation des épaisseurs des chaussées pour lutter contre le phénomène de gel. Ces épaisseurs sont également en forte diminution par rapport à la période d'analyse (Fig. 6.32).



**Fig. 6.32** – Changement de l'épaisseur nécessaire des chaussées contre le gel par rapport à la période de référence pour les différents facteurs de dimensionnement et périodes d'analyse (degré de gélivité G4 ; indice de radiation nul ; région climatique du Jura ; scénario climatique A2).



#### 6.3.3.4. Conclusions et recommandations

Il faut s'attendre à une forte baisse des indices de gel de l'air et donc à une diminution des profondeurs de pénétration du gel. Le phénomène de changement climatique est donc de ce côté bénéfique pour le dimensionnement des chaussées, car il suffira déjà dans un futur proche de mettre en place des surépaisseurs beaucoup plus faibles qu'actuellement. Ceci aura un impact favorable entre autres sur les coûts et la durée des travaux de construction.

Les résultats tirés de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel des structures routières est en parfaite corrélation avec les résultats obtenus dans la prévision des conditions météorologiques, et tout particulièrement dans l'analyse de l'évolution des cycles de gel et dégel (Chapitre 5.6).

La plupart des régions climatiques en Suisse ne nécessiteront plus de dimensionnement au gel à moyen ou long-terme. Néanmoins les régions montagneuses (Jura et Valais) seront toujours touché par le phénomène de gel, mais d'une manière moins marquée qu'actuellement. Il est recommandé d'adapter dans la norme sur le dimensionnement au gel (SN 670 140b (2001) [143]) les catégories de l'indice de gel significatif de l'air et d'introduire une évolution de ces catégories dans le temps (Tab. 6.10).

| Période d'analyse        | Jura    | Bassin lémanique | Plateau (ouest) | Plateau (est) | Préalpes | Valais (vallée du Rhône) | Valais (haute altitude) | Grisons | Sud des Alpes |
|--------------------------|---------|------------------|-----------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------|
| <b>SN 670 140b [143]</b> | 400-600 | 200-400          | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 800-1000                | 200-400 | 200-400       |
| <b>Court-terme</b>       | 400-600 | 0-200            | 200-400         | 200-400       | 200-400  | 200-400                  | 600-800                 | 200-400 | 0-200         |
| <b>Moyen-terme</b>       | 200-600 | 0-200            | 200-400         | 0-400         | 0-200    | 200-400                  | 400-800                 | 200-400 | 0-200         |
| <b>Long-terme</b>        | 200-400 | 0-200            | 0-400           | 0-400         | 0-200    | 0-400                    | 400-600                 | 0-400   | 0-200         |

**Tab. 6.10** – Nouvelles catégories d'indice de gel significatif de l'air pour les différentes régions climatiques.

Il convient de noter dans ce tableau que certaines catégories présentent des intervalles plus grands de l'indice de gel à cause des incertitudes liées aux différents scénarios climatiques. Il est recommandé d'utiliser, pour une chaussée réalisée entre 2020 et 2050, l'indice de gel significatif de l'air à court-terme, correspondant à la région climatique où l'infrastructure est planifiée. Pour une réalisation entre 2050 et 2080, respectivement entre 2080 et 2100, l'indice à moyen-terme, respectivement à long-terme, est à appliquer.

Une autre recommandation issue de l'évaluation effectuée dans ce chapitre consiste à changer la formule de calcul des températures journalières moyennes selon la norme SN 670 140b (2001) [143]. En effet, l'utilisation du facteur de calage  $k$  dans cette formule est devenue obsolète et présente des résultats approximatifs de la température moyenne journalière. Ainsi l'utilisation de la formule appliquée dans le cadre de cette thèse (moyenne des températures horaires sur une journée) est recommandée.

## 6.4. Impact du changement climatique – Méthode de dimensionnement mécanistique-empirique

L'outil de dimensionnement américain DARWin-ME a été utilisé en tant que méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. L'outil est basé sur le manuel de dimensionnement M-E PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide). DARWin-ME reprend les mêmes caractéristiques de base que l'outil M-E PDG, tout en améliorant certaines spécificités. M-E PDG a été développé en 2002 par l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) à travers le projet de recherche NCHRP 1-37A (National Cooperative Highway Research Program). Il a été mis au point afin de remplacer le manuel "Guide for Design of Pavement Structures" datant de 1986 et étant basé sur des équations de performances empiriques. Ces équations avaient été obtenues dans les années 50 lors des AASHO Road Tests et étaient basées sur des paramètres ayant perdu depuis toute leur signification (charges par essieux, types et pressions des pneus, types de matériaux, etc.).

La méthode mécanistique-empirique américaine a été retenue car il s'agit d'une méthode s'intéressant à la structure routière complète (fondation, plateforme, structure bitumineuse). Ainsi, son utilisation est adaptée pour une analyse détaillée de l'impact du changement climatique sur des structures routières types. En même temps, une bonne corrélation entre la méthode retenue et les modèles de comportement et lois d'évolution de l'orniérage a déjà été établie (Chapitre 6.2).

Dans ce chapitre, le fonctionnement de l'outil DARWin-ME/M-E PDG et les équations utilisées sont brièvement décrites (Chapitres 6.4.1 et 6.4.2). Ensuite les différentes hypothèses prises pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées et les paramètres évalués sont exposées (Chapitre 6.4.3). Finalement, les résultats principaux de cette évaluation sont présentés (Chapitre 6.4.4). Les résultats détaillés des différents scénarios et cas évalués sont donnés en annexe (Annexe 10.3).

### 6.4.1. Outils de dimensionnement DARWin-ME/M-E PDG [1][25]

Les outils DARWin-ME/M-E PDG se présentent sous forme de logiciels de dimensionnement et peuvent être utilisés pour le dimensionnement de structures neuves (souples, semi-rigides, rigides), ainsi que pour des structures réhabilitées. Pour ceci, les outils reposent sur des procédures de dimensionnement basées sur des approches incrémentales mécanistiques-empiriques. L'utilisateur est dans un premier temps invité à entrer les paramètres nécessaires (climat, trafic, fondation, etc.) et de proposer une infrastructure, puis l'outil évalue si la structure est suffisante par rapport à plusieurs critères de performances. Les outils restent interactifs et permettent à l'utilisateur de définir lui-même les critères, d'en choisir les paramètres de fiabilité et à proposer plusieurs variantes. Plusieurs paramètres peuvent également être tirés directement de la base de données des outils. Le schéma conceptuel de ces outils est donné dans la figure ci-après (Fig. 6.33).

Les deux outils sont divisés en trois étapes :

1. Evaluation : Dans un premier temps, une analyse du sol et de la fondation pour les nouvelles structures est effectuée. Pour le cas de travaux de réhabilitation, une analyse supplémentaire de la structure existante par des méthodes de mesure de déflexion et de backcalculation est réalisée. Ensuite, les caractéristiques matérielles des revêtements et du trafic sont intégrés dans le modèle et les caractéristiques de la structure liées au climat sont calculées à l'aide d'un modèle climatique intégré (Enhanced Integrated Climate Model – EICM).

Les différents données d'entrée (inputs) des outils peuvent être classés selon trois niveaux : niveau 1 – inputs détaillés obtenus par des essais et mesures directs ; niveau 2 – inputs obtenus par l'utilisation de corrélations connues ; niveau 3 – inputs déterminés par l'utilisation de données empiriques nationales ou régionales. Les différents inputs ne doivent

pas nécessairement être du même niveau, mais des combinaisons sont possibles (p.ex. données météorologiques horaires mesurées mais données de trafic estimées).

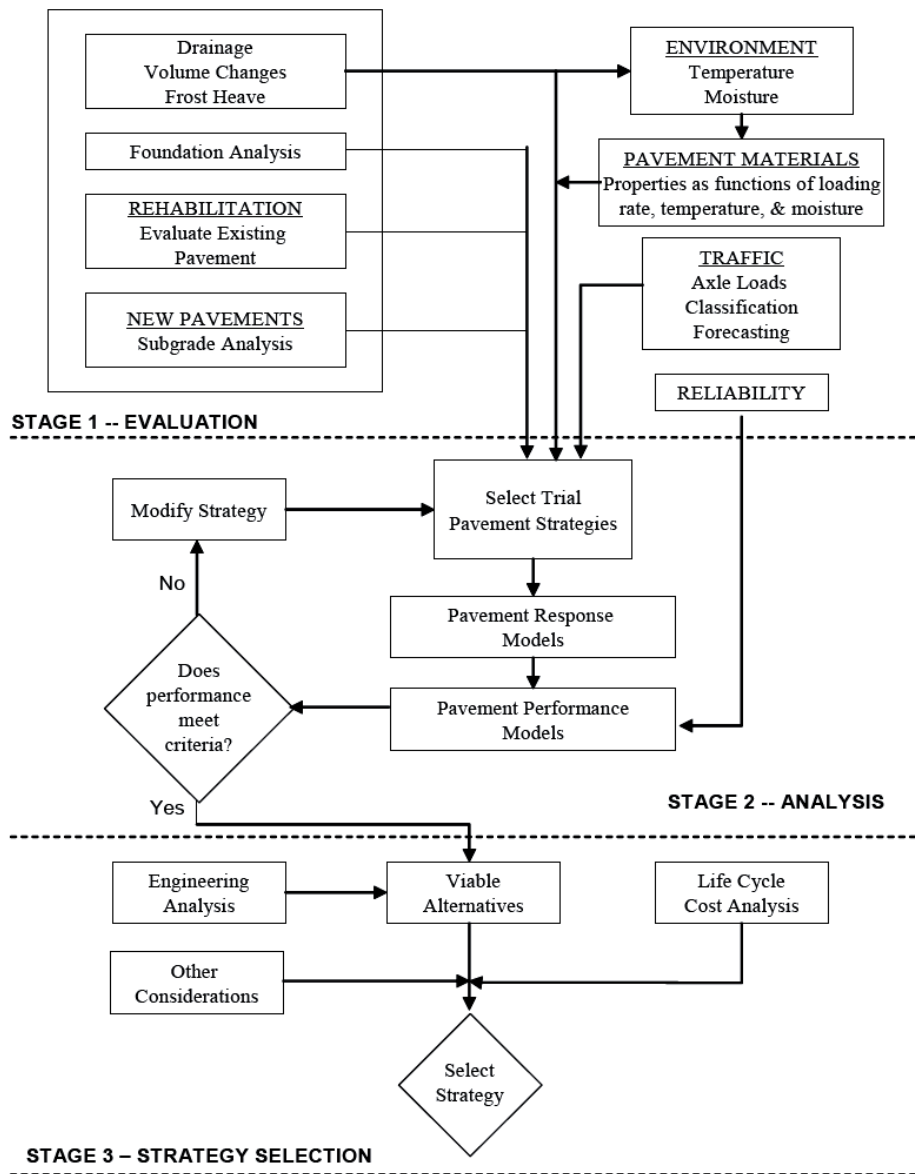


Fig. 6.33 – Schéma conceptuel des outils DARWin-ME/M-E PDG [1][25].

2. Analyse : Il s'agit d'une analyse itérative des performances des revêtements qui s'effectue de manière incrémentale pour différentes variantes et différentes stratégies. Dans un premier temps, une structure est définie et ses performances calculées. Ensuite ces performances sont comparées par rapport aux critères définies par approche probabiliste et si ceux-ci ne sont pas satisfaits, la structure est adaptée et une nouvelle itération a lieu. Ces itérations continuent jusqu'à ce qu'une structure satisfaisante est trouvée.

Concernant les revêtements souples et semi-rigides, deux méthodes d'analyses sont intégrées dans les outils : une méthode élastique multicouche pour les cas où tous les matériaux peuvent être modélisés linéairement, et une méthode non-linéaire d'éléments finis pour les cas où le comportement non linéaire des matériaux est pris en compte.

3. Sélection de la stratégie : Dans la dernière étape des analyses et considérations pratiques et économiques sont prises en compte pour comparer les différentes variantes de structure proposées, basées sur une analyse du cycle de vie des structures.

Les caractéristiques météorologiques prises en compte dans les deux outils sont la température, la précipitation, la radiation solaire, la vitesse du vent et l'humidité relative. Ces paramètres sont intégrés sous forme de données horaires dans le modèle climatique EICM, qui correspond à une partie intégrante des outils, afin de calculer la température et des caractéristiques liées à l'humidité dans la structure à tout moment du cycle de vie. Finalement, ces données sont utilisées pour déterminer les caractéristiques des matériaux composant la structure entière (module, profondeur de nappe phréatique, performances de drainage, etc.).

#### **6.4.2. Evaluation des performances [1][25]**

Les deux outils permettent d'évaluer certaines performances structurelles et fonctionnelles. Concernant les chaussées souples et semi-rigides, les performances suivantes sont analysées dans DARWin-ME/M-E PDG :

- Orniéragé : L'orniéragé est évalué séparément pour l'orniéragé des couches bitumineuses et pour l'orniéragé total de la structure.
- Fissuration par fatigue : La fissuration par fatigue du bas vers le haut et du haut vers le bas est évaluée, de même que la fatigue dans les éventuelles couches stabilisées (chaussées semi-rigides), à l'aide d'un indice de dégradation. La dégradation totale est obtenue en accumulant les indices à l'aide de la loi de Miner, puis elle est transformée en fissuration physique en utilisant des modèles calibrés.
- Fissuration thermique : La fissuration thermique (fissuration due aux basses températures et fissuration thermique par fatigue due aux cycles de températures) est également évaluée à l'aide d'un indice de dégradation incrémental comme la fissuration par fatigue.
- Performances fonctionnelles : Les performances fonctionnelles sont évaluées à l'aide d'un indice d'uni (International Roughness Index – IRI) représentatif de l'état fonctionnel d'une chaussée. Cet indice prend en compte des considérations relatives à l'orniéragé et la fissuration (fatigue et thermique), ainsi que des facteurs liés au site (IRI initial, conditions météorologiques, caractéristiques de la fondation), pour prédire la rugosité de la chaussée tout au long de son cycle de vie.

La manière dont ces paramètres sont évalués est décrite plus en détail dans les chapitres correspondants suivants (Chapitres 6.4.2.1 à 6.4.2.4).

##### *6.4.2.1. Orniéragé*

L'orniéragé est évalué séparément pour l'orniéragé des couches bitumineuses et pour l'orniéragé total de la structure. Les deux paramètres sont analysés en valeurs absolues, c.à.d. en termes de profondeur d'ornières en millimètres, et sont déterminés de manière incrémentale sur toute la durée de vie des chaussées.

Les formules utilisées pour déterminer l'orniéragé d'une structure font intervenir une multitude de paramètres par rapport aux matériaux, à la structure, aux fondations, aux conditions météorologiques, au trafic, etc. Concernant les conditions météorologiques, l'utilisation d'une méthode incrémentale de détermination de l'orniéragé permet de prendre en considération des conditions réelles avec leurs variabilités dans le temps. Le passage entre les conditions météorologiques de base (température de l'air, précipitations, etc.) et les formules employées pour la détermination de l'orniéragé, se fait à l'aide du modèle climatique EICM. Ce modèle permet tout particulièrement de déterminer la température dans une chaussée et sa variation en fonction du temps et de la profondeur pour des conditions météorologiques données.

L'orniérage est évalué individuellement pour chaque couche composant une chaussée (couche de surface bitumineuse, couche de base bitumineuse, couche de grave, etc.), en fonction des différents paramètres de la route et de l'environnement de celle-ci (climat, trafic, etc.). Le comportement des différentes couches peut être divisé en trois phases (Fig. 6.34) :

- Phase primaire : Phase d'orniérage initiale élevée due principalement aux changements volumétrique des matériaux.
- Phase secondaire : Phase d'orniérage constante faible due également aux changements volumétrique des matériaux, mais également à l'augmentation de la déformation plastique des matériaux avec l'augmentation des charges/impacts de l'environnement.
- Phase tertiaire : Phase d'orniérage élevée due principalement à la déformation plastique des matériaux.

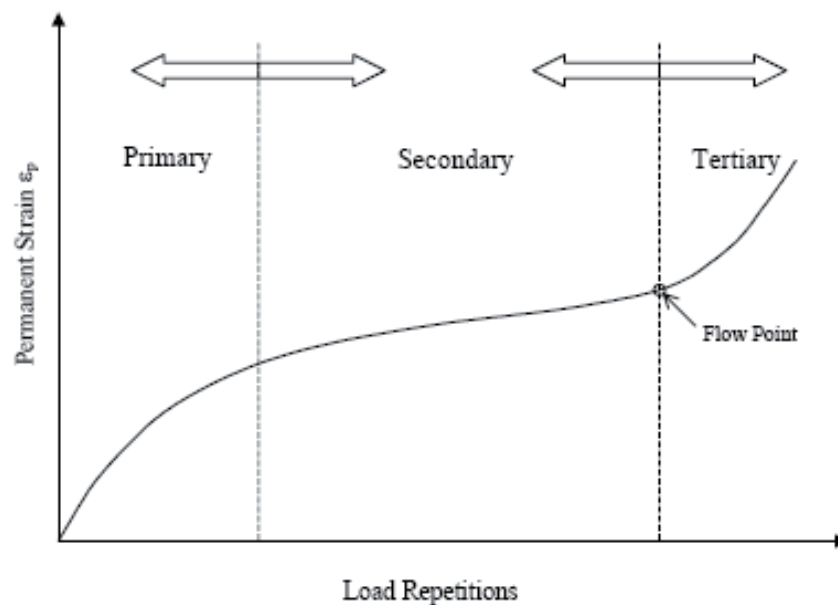


Fig. 6.34 – Comportement typique de la déformation permanente des matériaux bitumineux [1][25].

DARWin-ME/M-E PDG utilisent une approche qui modélise le comportement des chaussées pour les phases primaires et secondaires. La phase tertiaire n'est pas prise en considération, en effet les deux outils ne modélisent pas la déformation plastique des matériaux.

La déformation permanente globale d'une chaussée est obtenue par l'addition des déformations permanentes des différentes couches, lesquelles utilisent différents modèles de comportement selon le type de matériaux qui compose la couche. Mathématiquement parlant la déformation permanente est égale à :

$$RD = \sum_{i=1}^{n_{sublayers}} \epsilon_p^i \cdot h^i \quad (\text{Équation 14})$$

|        |                |                                       |      |
|--------|----------------|---------------------------------------|------|
| Avec : | RD             | Déformation permanente de la chaussée | [in] |
|        | nsublayers     | Nombre de couches                     | [-]  |
|        | $\epsilon_p^i$ | Déformation permanente de la couche i | [-]  |
|        | $h^i$          | Épaisseur de la couche i              | [in] |

Cette déformation permanente est déterminée pour chaque pas de temps et pour chaque niveau de charge puis finalement additionnée à la déformation permanente du pas de temps précédent (méthode incrémentale), et ceci jusqu'à la fin de la durée de vie de la chaussée.

Le modèle de détermination de la déformation permanente des couches bitumineuses est basé sur une analyse en laboratoire et in situ d'une multitude de revêtements différents. Le modèle de base est le suivant :

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{r1} \alpha_1 T^{\alpha_2} \beta_{r2} N^{\alpha_3} \beta_{r3} \quad (\text{Équation 15})$$

|        |                 |  |         |
|--------|-----------------|--|---------|
| Avec : | $\varepsilon_p$ | Déformation permanente accumulée après N répétitions de chargement | [in/in] |
|        | $\varepsilon_r$ | Déformation réversible du matériau bitumineux                      | [in/in] |
|        | N               | Nombre de chargements  | [-]     |
|        | T               | Température  | [°F]    |
|        | $\alpha_i$      | Coefficients de régression non linéaires                           | [-]     |
|        | $\beta_i$       | Coefficients de calibration  | [-]     |

Les différents paramètres ont été calibrés à l'aide de relevés in situ. Les valeurs numériques peuvent être consultées dans les guides de la méthode mécanistique-empirique [1][25]. Ces valeurs peuvent être adaptées dans les outils afin de calibrer les modèles aux conditions nationales de n'importe quel pays.

Les modèles de détermination de la déformation permanente des couches non liées (grave, fondation, etc.) sont également basés sur différentes analyses en laboratoire et in situ du comportement d'une multitude de matériaux non liés. Les formules utilisées sont explicitées dans les guides [1][25] et ne sont pas discutées dans ce rapport.

L'impact des conditions météorologiques sur l'orniérage des couches bitumineuses intervient directement dans le calcul des déformations permanentes à travers le paramètre de la température dans la structure. Ce paramètre évolue en fonction du temps et de la profondeur des couches évaluées. Pour les couches non liées, l'humidité du sol intervient dans la détermination de la déformation permanente de ces couches. Ce paramètre évolue également en fonction du temps et de la profondeur des couches évaluées.

#### 6.4.2.2. Fissuration par fatigue

La fissuration par fatigue est évaluée pour trois cas distincts :

- Fissuration du bas vers le haut : Il s'agit d'une fissuration qui apparaît dans un premier temps le long des traces de roues sous forme de fissuration longitudinale, et qui se propage rapidement pour former des fissures interconnectées sous forme de faïençage. Cette fissuration débute au bas des couches bitumineuses et se propage, sous chargement répété, vers la surface.

La fissuration du bas vers le haut est due au chargement répété des couches bitumineuses qui occasionne des cycles de flexion en bas des couches. L'accumulation des contraintes de traction peut se traduire par la formation de microfissures lorsque la contrainte maximale est dépassée. Ces microfissures peuvent ensuite remonter vers la surface des couches bitumineuses (Fig. 6.35).

- Fissuration du haut vers le bas : Il s'agit d'une fissuration qui apparaît le long des traces de roues sous forme de fissuration longitudinale. Cette fissuration débute à la surface des couches bitumineuses et se propage, sous chargement répété, le long des traces de roues.

La fissuration du haut vers le bas est due au chargement répété des couches bitumineuses par des pneus à pression élevée qui font apparaître des contraintes de tractions à la surface de la structure. L'accumulation des contraintes de traction peut se traduire par la formation de microfissures lorsque la contrainte maximale est dépassée. Le vieillissement des couches bitumineuses joue également un rôle prépondérant dans l'apparition et la propagation de ces fissures (Fig. 6.35).

- Fissuration par fatigue dans les couches stabilisées (chaussées semi-rigides) : Il s'agit d'une fissuration qui apparaît dans les éventuelles couches stabilisées des chaussées semi-rigides. Cette fissuration n'est pas visible depuis la surface de la structure.

La fissuration par fatigue dans les couches stabilisées se comporte comme la fissuration du bas vers le haut des couches bitumineuses.

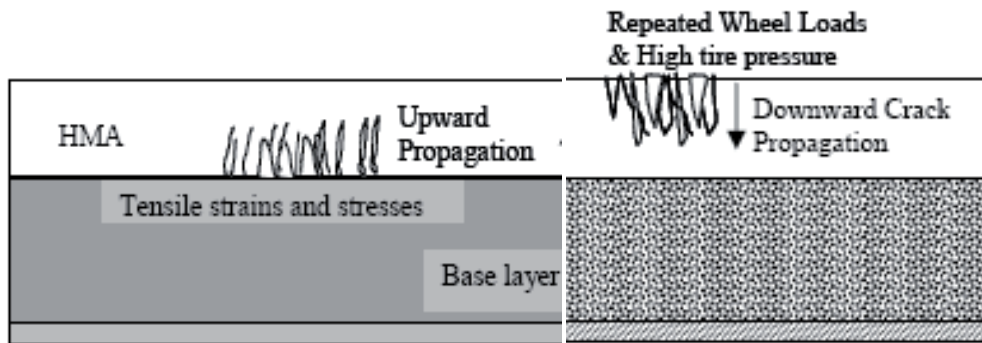


Fig. 6.35 – Fissuration par fatigue du bas vers le haut (gauche) et du haut vers le bas (droite) [1][25].

Les formules utilisées pour déterminer la fissuration par fatigue d'une structure font intervenir une multitude de paramètres par rapport aux matériaux, à la structure, au trafic, aux conditions météorologiques, etc. Le facteur principal intervenant dans la fatigue des couches bitumineuses est la rigidité des matériaux.

Les différents cas de fissuration par fatigue sont évalués séparément à l'aide d'indices de dégradation pour chaque couche bitumineuse composant une chaussée (couche de surface, couche de base, couche stabilisée, etc.). La dégradation totale est obtenue en accumulant les indices à l'aide de la loi de Miner, puis elle est transformée en fissuration physique en utilisant des modèles calibrés. Ces modèles sont basés sur un suivi à long terme des performances d'une multitude de revêtements sujets à des conditions climatiques, des conditions de trafic et des conditions environnementales distinctes.

La loi de Miner permet de décrire la dégradation totale à l'aide de la formule ci-après :

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{Équation 16})$$

|        |       |  |     |
|--------|-------|--|-----|
| Avec : | D     | Dégradation  | [-] |
|        | T     | Nombre de périodes   | [-] |
|        | $n_i$ | Trafic pour la période i   | [-] |
|        | $N_i$ | Trafic acceptable sous les conditions prévalant pendant la période i | [-] |

Le modèle de détermination de la fissuration par fatigue des couches bitumineuses est basé sur une analyse en laboratoire et in situ d'une multitude de revêtements différents. Le modèle final utilisé pour décrire les indices de dégradations est le suivant :

$$N_f = 0.00432 \cdot k'_1 \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281} \quad (\text{Équation 17})$$

|        |        |  |  |
|--------|--------|--|--|
| Avec : | $N_f$  | Nombre de répétitions de chargement jusqu'à la fissuration par fatigue | [-]  |
|        | $k'_1$ | Paramètre fonction de l'épaisseur des couches bitumineuses             | [-]  |
|        |        | Pour la fissuration du bas vers le haut :                              | $k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot h_{ac})}}}$ |
|        |        | Pour la fissuration du haut vers le bas :                              | $k'_1 = \frac{1}{0.01 + \frac{12}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 \cdot h_{ac})}}}$        |
|        | Avec : | $h_{ac}$   | Epaisseur totale des couches bitumineuses [in]                                     |
|        |        | C  | Coefficient de calage laboratoire – in situ [-]                                    |
|        |        | $\varepsilon_t$  | Déformation à la traction critique [-]   |
|        |        | E  | Module de rigidité du matériau [-]   |

A l'aide de la loi de Miner, les indices de dégradation sont transformés en dégradation totale, puis des modèles spécifiques sont appliqués pour transformer la dégradation totale en fissuration physique :

Pour la fissuration du bas vers le haut :

$$FC_{bot} = \left( \frac{6000}{1 + e^{(c_1 \cdot c'_1 + c_2 \cdot c'_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot \left( \frac{1}{60} \right) \quad (\text{Équation 18})$$

|        |            |   |     |
|--------|------------|---|-----|
| Avec : | $FC_{bot}$ | Fissuration par fatigue du bas vers le haut | [%] |
|        | $C_x^y$    | Coefficients de calibration                 | [-] |
|        | D          | Dégradation totale                          | [-] |

Pour la fissuration du haut vers le bas :

$$FC_{top} = \left( \frac{1000}{1 + e^{(7 - 3.5 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot (10.56) \quad (\text{Équation 19})$$

|        |            |   |           |
|--------|------------|---|-----------|
| Avec : | $FC_{top}$ | Fissuration par fatigue du haut vers le bas | [ft/mile] |
|        | D          | Dégradation totale                          | [-]       |

Les différents paramètres ont été calibrés à l'aide de relevés in situ. Les valeurs numériques peuvent être consultées dans les guides [1][25]. Ces valeurs peuvent être adaptées dans les outils afin de calibrer les modèles aux conditions nationales de n'importe quel pays.

Les modèles de détermination de la fissuration par fatigue dans les couches stabilisées sont également basés sur différentes analyses en laboratoire et in situ du comportement d'une multitude de matériaux stabilisés. Les formules utilisées sont explicitées dans les guides [1][25] et ne sont pas discutées dans ce rapport.



L'impact des conditions météorologiques sur la fissuration par fatigue des couches bitumineuses et des couches stabilisées intervient principalement à travers le changement de la rigidité des matériaux en fonction de la température. La rigidité évolue entre autres en fonction du temps, de la température et du matériau des couches évaluées.

#### 6.4.2.3. Fissuration thermique

La fissuration thermique est évaluée pour deux cas distincts :

- Fissuration due aux basses températures : Il s'agit d'une fissuration qui apparaît dans le sens perpendiculaire à l'axe de la route. Cette fissuration débute à la surface des couches bitumineuses et se propage lors de périodes de basses températures. Elle ne dépend que très peu des cycles de chargement de la chaussée.

La fissuration peut apparaître dans des régions où des températures extrêmement froides sont observées. Elle est due à une contraction et une rupture thermique de la surface des couches bitumineuses due à la forte chute des températures.

- Fissuration par fatigue due aux cycles de températures : Il s'agit également d'une fissuration qui apparaît dans le sens perpendiculaire à l'axe de la route. Cette fissuration débute à la surface des couches bitumineuses et se propage lors de cycles de températures journaliers. Elle ne dépend que très peu des cycles de chargement de la chaussée.

La fissuration peut apparaître dans des régions où des variations de températures journalières et saisonnières importantes sont répertoriées. Elle est due à une contraction et une rupture thermique de la surface des couches bitumineuses due à une répétition de cycles de températures.

Les formules utilisées pour déterminer la fissuration thermique d'une structure font intervenir une multitude de paramètres par rapport aux matériaux, à la structure, aux conditions météorologiques, etc. Les facteurs principaux intervenant dans la fissuration thermique des couches bitumineuses sont la rigidité des matériaux, ainsi que les paramètres météorologiques. Ces derniers sont intégrés dans le modèle EICM et permettent ainsi de déterminer la température dans un revêtement et sa variation en fonction du temps et de la profondeur.

Les deux cas de fissuration thermiques sont évalués séparément à l'aide d'indices de dégradation pour les couches bitumineuses de surface. La dégradation totale est obtenue en accumulant les indices à l'aide de la loi de Miner, puis elle est transformée en fissuration physique en utilisant des modèles calibrés. Ces modèles sont basés sur un suivi à long terme de la fissuration d'une multitude de revêtements sujets à des conditions climatiques et des conditions environnementales distinctes.

Le modèle de fissuration thermique des couches bitumineuses est basé sur une analyse en laboratoire et in situ d'une multitude de revêtements différents. La loi de Paris est utilisée par les outils pour prédire la propagation des fissures :

$$\Delta C = A \cdot \Delta K^n \quad (\text{Équation 20})$$

|        |            |   |     |
|--------|------------|---|-----|
| Avec : | $\Delta C$ | Changement de la profondeur de fissure due à un cycle de refroidissement    | [-] |
|        | $\Delta K$ | Changement de l'intensité des contraintes due à un cycle de refroidissement | [-] |
|        | $A, n$     | Paramètres de rupture   | [-] |

Les différents paramètres ont été calibrés à l'aide de relevés in situ et d'essais en laboratoire. Les valeurs numériques peuvent être consultées dans les guides [1][25]. Ces valeurs peuvent être adaptées dans les outils afin de calibrer les modèles aux conditions nationales de n'importe quel pays.

L'impact des conditions météorologiques sur la fissuration thermique des couches bitumineuses et intervient principalement à travers le changement de la rigidité des matériaux en fonction de la température. La rigidité évolue entre autre en fonction du temps, de la température et du matériau des couches évaluées.

#### 6.4.2.4. Performances fonctionnelles

Les performances fonctionnelles sont évaluées à l'aide de l'indice d'uni IRI (International Roughness Index). Cet indice représente l'état fonctionnel d'un revêtement en prenant en compte des considérations relatives à l'orniérage et la fissuration (fatigue et thermique), ainsi que des facteurs liés au site (IRI initial, conditions météorologiques, caractéristiques de la fondation). L'IRI permet de prédire la rugosité d'un revêtement tout au long de son cycle de vie. Il s'agit d'une caractéristique fonctionnelle d'une route qui est perçue par les utilisateurs à travers des mouvements verticaux de leurs véhicules.

Les modèles utilisés pour déterminer l'IRI d'une structure font intervenir une multitude de paramètres par rapport aux matériaux, à la structure, aux conditions météorologiques, etc. L'IRI est déterminé séparément pour les différentes couches composant une structure routière (couches bitumineuses, couches non liées, couches traitées, etc.) et est fortement dépendant des conditions initiales (IRI initial) d'une route. Les différents modèles et leurs paramètres ont été calibrés dans une multitude de projets de recherche. Les guides [1][25] décrivent plus en détail les modèles utilisés dans les deux outils. L'indice initial retenu est égal à 1 m/km pour tous les cas évalués dans le cadre de cette thèse (IRI initial).

L'impact des conditions météorologiques sur l'IRI intervient de manière directe à travers certains paramètres, tels que l'indice de gel ou les précipitations mensuelles, et de manière indirecte à travers le changement des autres performances en fonction des conditions météorologiques (orniérage, fissuration).

#### 6.4.3. Hypothèses et paramètres d'analyse

Pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées, différentes hypothèses ont été retenues concernant les paramètres généraux, météorologiques, structurels, etc. Ces paramètres sont décrits brièvement dans ce chapitre, les détails peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.3.1).

##### 6.4.3.1. Paramètres généraux

Les paramètres généraux sont identiques pour tous les cas évalués :

- Durée de vie : Une durée de vie fixe de 20 ans a été choisie dans cette partie de la thèse (l'impact du changement climatique sur la durée de vie des chaussées est évalué dans le Chapitre 7).
- Horizons d'analyse : Quatre horizons d'analyse sont évalués (référence : chaussée réalisée en 1990, court-terme : réalisation en 2020, moyen-terme : réalisation en 2050 et long-terme : réalisation en 2080).
- Performances : Sept performances structurelles et fonctionnelles ont été évaluées (orniérage : orniérage des couches bitumineuses et orniérage total, fissuration par fatigue : fissuration du bas vers le haut, du haut vers le bas et des éventuelles couches stabilisées (chaussées semi-rigides), fissuration thermique et performances fonctionnelles (IRI)) (Chapitre 6.4.2). Pour l'IRI une valeur initiale de 1 m/km a été retenue.
- Considérations probabilistes : Les performances moyennes (probabilité de 50%) ont été évaluées pour toutes les performances structurelles et fonctionnelles.

#### 6.4.3.2. Paramètres météorologiques

Les paramètres météorologiques sont issus du modèle climatique de pronostic Meteonorm 7.0. Les paramètres suivants ont été évalués :

- Régions climatiques : Huit régions climatiques suisses présentant des caractéristiques climatiques différentes ont été évaluées (Jura, Bassin Lémanique, Plateau (ouest), Plateau (est), Préalpes, Valais, Grisons et Sud des Alpes). La région du Valais a en outre été divisée en deux parties : Haute altitude et vallée du Rhône (Chapitre 5.1.2).
- Scénarios climatiques : Trois scénarios climatiques proposés par l'IPCC ont été évalués (scénario B1 - intégré et écologique, scénario A1B - intégré (balance énergies fossiles - non-fossiles) et scénario A2 - hétérogène) (Chapitre 5.1.1).
- Périodes d'analyse météorologiques : Pour chaque région et chaque scénario climatique, de même que pour tous les horizons d'analyse, des périodes d'analyses météorologiques spécifiques ont été évaluées. Une période d'analyse consiste en une combinaison d'années météorologiques représentatives moyennes et extrêmes sur 20 ans (p.ex. pour le moyen-terme, la période est divisée en deux parties, la première de 2050 à 2059 et la deuxième de 2060 à 2069, avec chaque partie comportant huit années météorologiques moyennes et 2 années extrêmes) (Chapitre 5.1.1).
- Caractéristiques météorologiques : Les caractéristiques météorologiques suivantes ont été évaluées : Température de l'air [°C], vitesse du vent [km/h], ensoleillement horaire [%], précipitations [mm] et humidité relative [%].
- Profondeur nappe phréatique : Une profondeur de 3.6 m a été choisie arbitrairement pour tous les cas testés. Cette profondeur élevée permet de ne pas tenir compte de l'impact de la nappe phréatique sur les performances des chaussées évaluées.

#### 6.4.3.3. Paramètres de trafic

Les paramètres de trafic sont identiques pour chaque classe de trafic évaluée. En outre les analyses sont faites à trafic équivalent, c.-à-d. les paramètres de trafic sont identiques entre les différents horizons d'analyse :

- Classes de trafic : Quatre régimes de trafic sont évalués (classes de trafic T3 à T6). Des données statistiques et des données issues des normes suisses sont employées pour définir tous les paramètres de trafic nécessaires (% poids lourds, croissance du trafic, vitesse, etc.). Les principales valeurs spécifiques de ces paramètres sont les suivantes :
  - Classe T3 et T4 (Route principale) : Les classes de trafic T3, respectivement T4, présentent un trafic journalier moyen de 3600 véhicules par jour, respectivement 12'000 véhicules par jour. Le pourcentage de poids lourds est de 6% pour les deux classes et un taux d'accroissement de 3% est appliqué au trafic annuel. Une voie par direction avec une vitesse de 80 km/h est appliquée.
  - Classe T5 et T6 (Autoroute) : Les classes de trafic T5, respectivement T6, présentent un trafic journalier moyen de 37'000 véhicules par jour, respectivement 120'000 véhicules par jour. Le pourcentage de poids lourds est de 7% pour les deux classes et un taux d'accroissement de 4% est appliqué au trafic annuel. Deux voies par direction pour la classe T5 et trois voies par direction pour la classe T6 sont appliquées. La vitesse est de 100 km/h pour les deux classes.

Toutes les valeurs spécifiques sont détaillées en annexe (Annexe 10.3.1.3).

#### 6.4.3.4. Paramètres structurels

Les paramètres structurels suivants ont été évalués :

- Sol de fondation : Trois classes de sols de fondation sont évaluées (classe de portance S2 à S4). Des données issues des normes suisses sont employées pour définir tous les paramètres de fondation nécessaires (CBR, module, etc.). Les principales valeurs spécifiques de ces paramètres sont les suivantes :
  - Classe S2 : Un CBR moyen de 9% et un module de 72 MPa est appliqué à cette classe. Un sol de type GM est choisi.
  - Classe S3 : Un CBR moyen de 18% et un module de 112 MPa est appliqué à cette classe. Un sol de type GM est choisi.
  - Classe S4 : Un CBR moyen de 27% et un module de 145 MPa est appliqué à cette classe. Un sol de type GM est choisi.

Toutes les valeurs spécifiques sont détaillées en annexe (Annexe 10.3.1.4).

- Type de superstructure : Trois types de superstructure sont évalués. Les caractéristiques des superstructures sont choisies selon le catalogue des superstructures de la norme SN 640 324b [114]. Les principales valeurs spécifiques de ces paramètres sont les suivantes :
  - Type 1 Enrobé bitumineux sur grave : Couches d'enrobé bitumineux sur couche de grave avec des épaisseurs variables selon le sol de fondation et la classe de trafic.
  - Type 2 Enrobé bitumineux avec couche de fondation en enrobé bitumineux (AC F) : Couches d'enrobé bitumineux sur couche de fondation en enrobé bitumineux et sur couche de grave avec des épaisseurs variables selon le sol de fondation et la classe de trafic.
  - Type 5 Enrobé bitumineux avec couche stabilisée aux liants hydrauliques : Couches d'enrobé bitumineux sur couche de stabilisation aux liants hydrauliques avec des épaisseurs variables selon le sol de fondation et la classe de trafic.

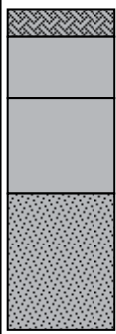
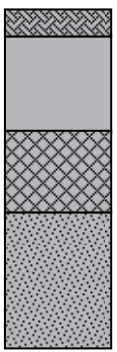
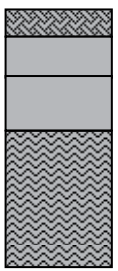
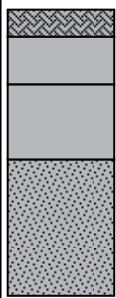
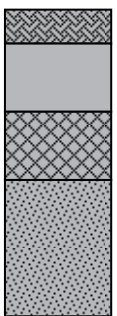
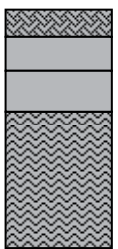
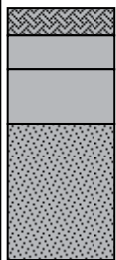
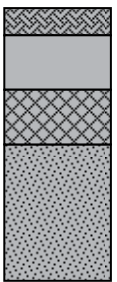
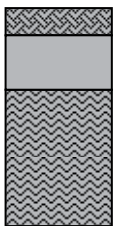
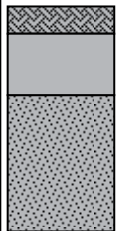
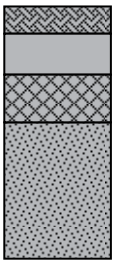
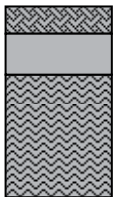
Toutes les valeurs spécifiques sont détaillées en annexe (Annexe 10.3.1.4). Dans la figure ci-après est donné un aperçu des différents types de couches bitumineuses évaluées avec leurs épaisseurs relatives (Fig. 6.36).

- Types d'enrobés : Des types d'enrobés employés couramment en Suisse ont été choisis (Fig. 6.36). Le choix s'est fait à l'aide de la norme SN 640 430b [118]. Les principales valeurs spécifiques de ces paramètres sont les suivantes :
  - Couches de roulement : Enrobé bitumineux standard AC 11.
  - Couches de liaison : Enrobé bitumineux standard AC B 16 ou AC B 22.
  - Couches de base : Enrobé bitumineux standard AC T 16, AC T 22 ou AC T 32.
  - Couches de fondation : Enrobé bitumineux standard AC F 22 ou AC F 32.

Toutes les valeurs spécifiques sont détaillées en annexe (Annexe 10.3.1.4).

Le logiciel DARWin-ME nécessite la mise en place de minimum deux couches non liées. Ainsi pour les structures de Type 5 et pour les structures de Type 2 avec un sol de fondation S4, le sol de fondation est divisé en deux couches présentant des propriétés identiques.

Le logiciel DARWin-ME permet la mise en place de maximum trois couches liées. Ainsi pour les structures de Type 2 avec un trafic T5 et T6, la couche de liaison est supprimée et les couches de roulement et de base sont augmentées en fonction.

| Classe de trafic | Superstructure 1  | Superstructure 2  | Superstructure 5   |
|------------------|---|---|--|
| T6               |  <p>40 mm AC 11<br/>90 mm AC B 22<br/>140 mm ACT 32<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC 11<br/>140 mm ACT 32<br/>110 – 140 mm ACF 32<br/>0 – 300 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC 11<br/>60 mm AC B 16<br/>80 mm ACT 22<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p> |
| T5               |  <p>40 mm AC 11<br/>70 mm AC B 22<br/>110 mm ACT 32<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>50 mm AC 11<br/>100 mm ACT 22<br/>90 – 110 mm ACF 22<br/>0 – 300 mm Grave</p>  |  <p>40 mm AC 11<br/>50 mm AC B 16<br/>60 mm ACT 22<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p> |
| T4               |  <p>40 mm AC 11<br/>50 mm AC B 16<br/>80 mm ACT 22<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC 11<br/>80 mm ACT 22<br/>70 – 90 mm ACF 22<br/>0 – 300 mm Grave</p>   |  <p>40 mm AC 11<br/>80 mm ACT 22<br/>160 – 240 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p>                  |
| T3               |  <p>40 mm AC 11<br/>90 mm ACT 22<br/>150 – 350 mm Grave</p>                  |  <p>40 mm AC 11<br/>60 mm ACT 16<br/>70 mm ACF 22<br/>0 – 250 mm Grave</p>       |  <p>40 mm AC 11<br/>60 mm ACT 16<br/>160 – 200 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p>                 |

**Commentaires :** Selon DARWin-ME : Min 2 couches non-liées nécessaires

Pour S4-SS2 et S2-SS5 à S4-SS5 : La plateforme est divisée en deux couches avec des propriétés identiques (première couche 1000 mm, deuxième couche infinie)

Selon DARWin-ME : Max 3 couches liées possibles

Pour T5-SS2 et T6-SS2 : La couche de liaison est supprimée

**Fig. 6.36** – Types de couches bitumineuses évaluées.

#### 6.4.3.5. Paramètres des matériaux

Des caractéristiques standards pour les matériaux granulaires, traités aux liants hydrauliques et bitumineux ont été évaluées (teneur en vides, teneur en liant, courbe granulométrique, etc.). Des paramètres moyens ont été choisis, basés sur les normes suisses (enrobé bitumineux : SN 640 431-1b [119] et SN 640 430b [118], liants bitumineux : SN 670 202 [144], graves non traitées : SN 670 119a [142], sols de fondation : SN 670 010b [137], etc.).

Les valeurs spécifiques de ces paramètres sont données en annexe (Annexe 10.3.1.5).

#### **6.4.4. Impact du changement climatique sur les performances – Résultats principaux**

L'impact du changement climatique sur les différentes performances des chaussées classiques mises en place en Suisse est évalué dans ce chapitre. Les résultats principaux sont décrits dans les chapitres à suivre (Chapitres 6.4.4.1 à 6.4.4.4) puis un résumé des impacts majeurs est donné (Chapitre 6.4.4.5). Les impacts sont décrits dans les prochains chapitres à l'aide d'exemples choisis. Les détails des résultats issus de DARWin-ME peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.3.2). L'impact du changement climatique sur la durée de vie des chaussées est évalué dans le Chapitre 7.

##### *6.4.4.1. Orniérage*

Dans l'outil de dimensionnement DARWin-ME, l'orniérage est évalué séparément pour l'orniérage des couches bitumineuses et pour l'orniérage total de la structure. Ceci permet de différencier les deux phénomènes principaux qui sont le fluage de l'enrobé dans les couches supérieures et la déformation verticale des couches de fondation et/ou du sol (Chapitre 6.1.1).

Dans le cas des structures routières suisses, il existe des valeurs limites par rapport à la gravité de cette dégradation (orniérage total uniquement). La gravité est caractérisée par la profondeur d'ornières : Gravité faible (S1) avec une profondeur inférieure à 15 mm ; Gravité moyenne (S2) avec une profondeur comprise entre 15 et 30 mm ; Gravité élevée (S3) avec une profondeur supérieure à 30 mm. L'orniérage peut aussi être décrit par l'indice de la planéité transversale  $I_3$ , qui lui propose des valeurs limites en fonction du type de route (12 mm pour les autoroutes et 18 mm pour les routes principales – valeurs limites pour un état mauvais) (Chapitre 6.1.1.2).

L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose également différentes valeurs limites par rapport à l'orniérage des couches bitumineuses selon le type de route considéré. Par exemple un orniérage des couches bitumineuses inférieure à 6.4 mm, respectivement 8.9 mm, est adéquat pour les autoroutes, respectivement les routes principales. L'orniérage reste marginal pour des profondeurs inférieures à 10.2 mm pour les autoroutes et 15.2 mm pour les routes principales (valeurs de sécurité). Ces valeurs sont légèrement plus strictes que les valeurs limites proposées par les normes suisses.

Par la suite, l'impact du changement climatique sur l'orniérage total de la structure a été évalué dans un premier temps, puis l'orniérage des couches bitumineuses a été analysé afin d'évaluer la répartition de l'orniérage dans la structure.

##### ***Orniérage total de la structure***

De manière générale l'on peut constater que l'orniérage correspond à une performance critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. En effet plusieurs cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (route réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent un orniérage total supérieur aux valeurs limites ou proche de celles-ci. Ceci est valable principalement pour les régions du Bassin Lémanique (Lausanne) et du Tessin (Lugano) pour des classes de trafic élevées (T5 et T6). L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur l'orniérage total des chaussées est important et se traduit dans tous les cas par une augmentation de la profondeur d'ornières. Des valeurs maximales absolues de la profondeur d'ornières de plus de 25 mm sont observées pour divers cas évalués (scénario climatique, horizon d'analyse). Les augmentations relatives peuvent dépasser les 20%.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des évaluations effectuées :

- Trafic : L'évaluation indique de manière générale un orniérage total plus élevé pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.37). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières. Pour les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) la différence entre l'orniérage pour une structure à trafic T3 et une structure à trafic T6 est très élevée (différences de 100% à plus que 200%). Pour les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) la différence est également élevée (différences jusqu'à 100%).

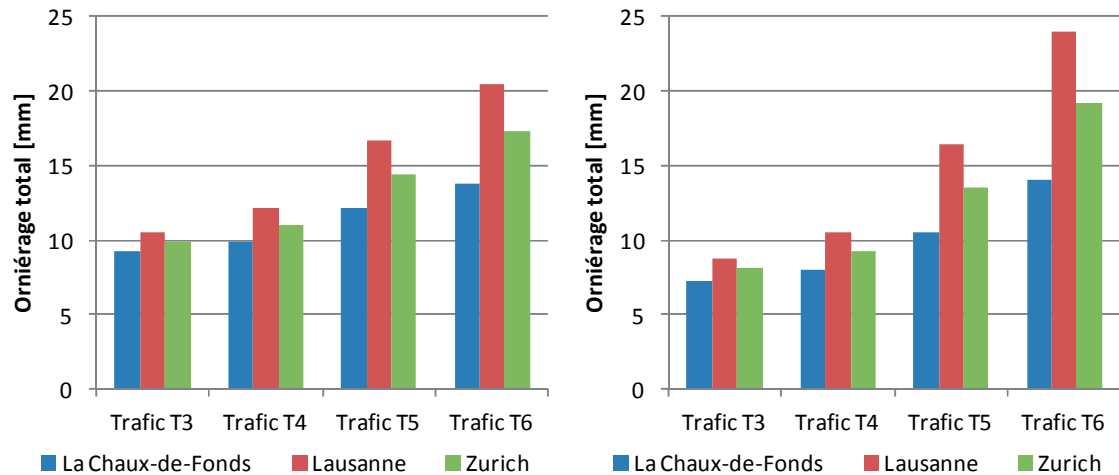


Fig. 6.37 – Impact du trafic sur l'orniérage total (Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence).

- Sol de fondation : L'évaluation indique de manière générale un orniérage total plus faible pour les classes de portance supérieures (Fig. 6.38). Notons que le passage d'une classe de portance à une classe supérieure est associé à diminution de l'épaisseur des couches de fondation (grave, AC F, stabilisation) des structures routières. Pour les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) l'orniérage des sols de fondation S4 présente des valeurs très proches des sols S3 (Fig. 6.38 – graphique de droite).

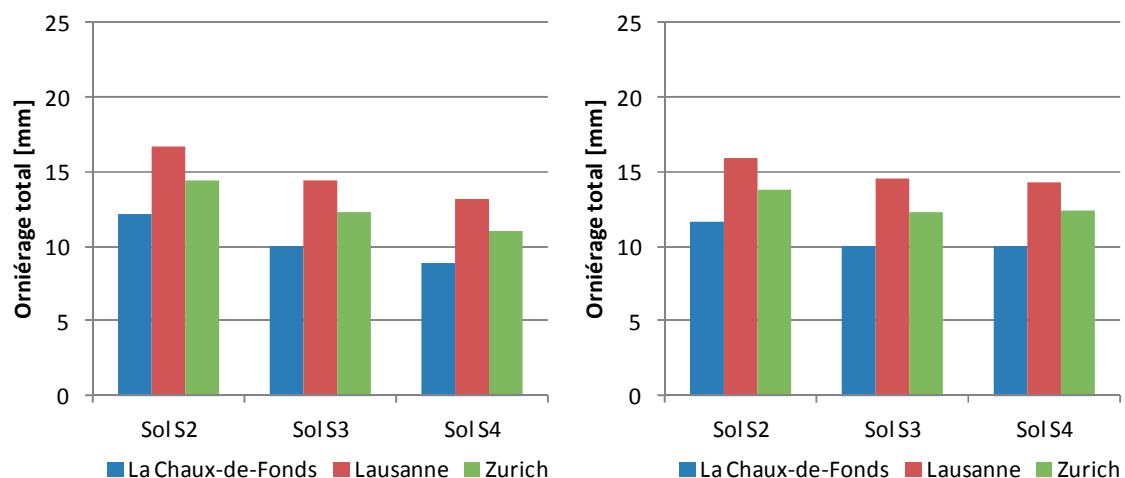


Fig. 6.38 – Impact du sol de fondation sur l'orniérage total (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence).

- Type de superstructure : De manière générale il n'existe pas de tendance nette par rapport au type de superstructure. En effet, en fonction du trafic et du sol de fondation, un type de superstructure peut présenter un orniérage total plus élevé ou plus faible que les autres. Pour un trafic élevé (classes de trafic T5 et T6), l'orniérage total est de manière générale plus élevé pour les structures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) (Fig. 6.39 – graphique de droite). Pour un trafic faible et moyen T3 à T5 l'orniérage est de manière générale plus élevé pour les structures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) ou 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) (Fig. 6.39 – graphique de gauche).

Les structures de type 5 avec un sol de fondation S2 et un trafic T6 présentent les profondeurs d'ornières les plus élevées.

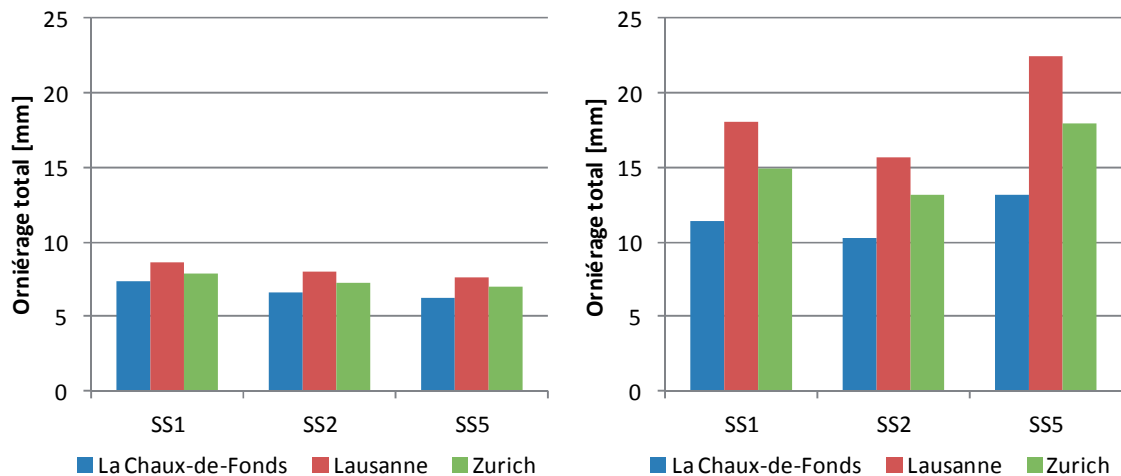


Fig. 6.39 – Impact du type de superstructure sur l'orniérage total (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Période de référence).

- Région climatique : L'orniérage total présente une variabilité importante entre les différentes régions climatiques. Ainsi, les régions du Tessin (Lugano) et du Bassin Lémanique (Lausanne) présentent clairement les valeurs les plus élevées, alors que les régions du Jura (La Chaux-de-Fonds), du Valais à haute altitude (Simplon) et dans une moindre mesure du Plateau Ouest (Berne), présentent les valeurs les plus basses. Les autres sites se situent entre ces deux extrêmes. Ceci est observé pour tous les cas évalués (Fig. 6.40).

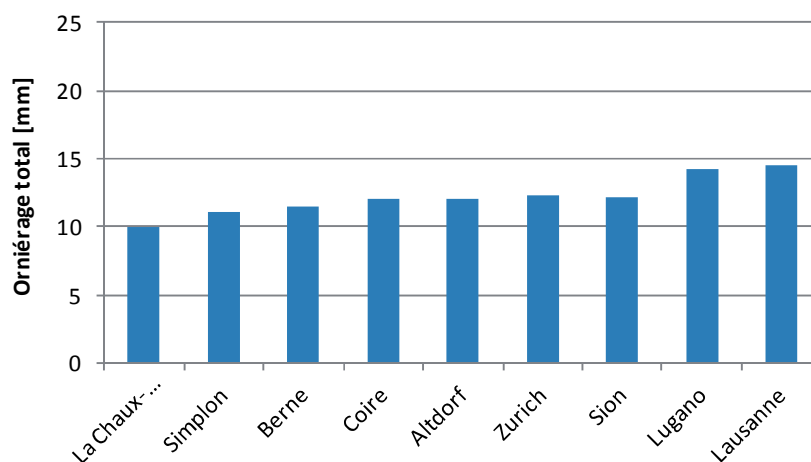
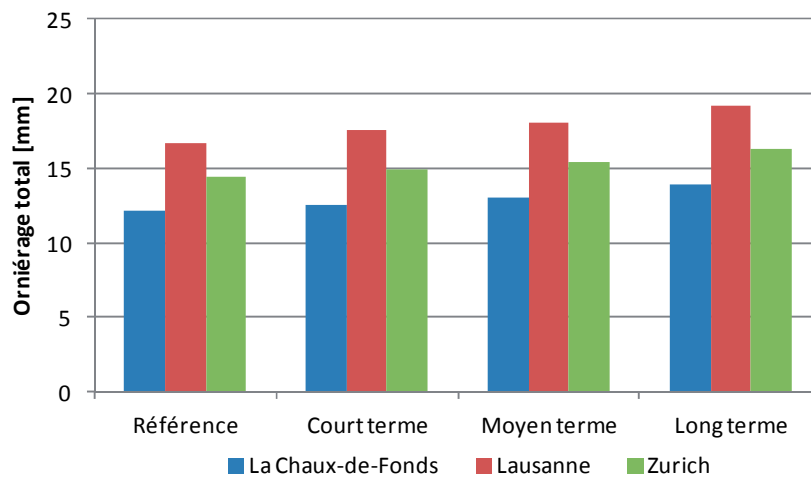


Fig. 6.40 – Impact de la région climatique sur l'orniérage total (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence).



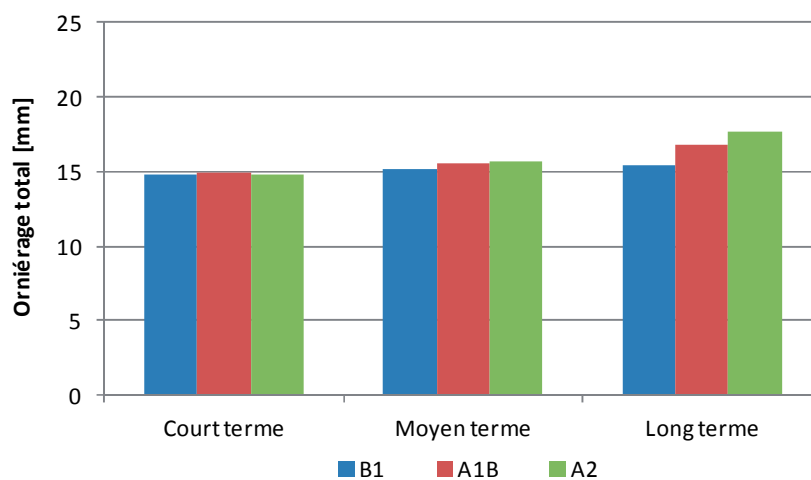
- Horizon d'analyse : En tenant compte du changement climatique, l'orniérage total a tendance à être plus élevé avec le temps pour la totalité des cas évalué (Fig. 6.41). L'augmentation est différente selon le cas évalué. Pour un trafic T3, l'augmentation maximale reste inférieure à 13% entre la période de référence et la période 2080-2100, alors que pour un trafic T6, celle-ci peut atteindre les 28%. Les augmentations en valeurs absolues les plus élevées sont observées pour les régions du Bassin Lémanique (Lausanne) et du Tessin (Lugano). Des augmentations plus faibles touchent d'avantage les régions plus froides (Jura, Valais à haute altitude) et les régions du Plateau et des Préalpes. Les valeurs maximales de l'orniérage total se présentent pour l'horizon à long terme (route construite en 2080).

En valeurs relatives, les augmentations entre la période de référence et le période de 2080-2100 sont également différentes en fonction des régions évaluées.



**Fig. 6.41** – Impact de l'horizon d'analyse sur l'orniérage total (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A2).

- Scénario climatique : A court et à moyen-terme, l'orniérage total ne présente que très peu de différences entre les scénarios climatiques évalués. A long-terme par contre, la profondeur d'ornières est la plus élevée pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et la moins élevée pour le scénario B1 (intégré et écologique). Le scénario A1B (intégré) présente des valeurs intermédiaires aux deux autres scénarios (Fig. 6.42).



**Fig. 6.42** – Impact du scénario climatique sur l'orniérage total (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Lausanne).

L'orniérage total correspond à une performance critique des chaussées suisses standards sur les routes à trafic élevé et très élevé. En effet, les valeurs limites de la profondeur d'ornières selon les normes suisses sont actuellement dépassées ou très proches de celles-ci pour plusieurs cas évalués avec un trafic T5 ou T6. Ceci indique pour certains cas un dimensionnement insuffisant des chaussées selon la méthode de dimensionnement SN 640 324b [114]. Le phénomène de changement climatique risque d'accentuer ce phénomène, avec des conséquences importantes étant donné la faible différence entre les profondeurs d'ornières actuelles et les valeurs limites. Ainsi, selon la méthode mécanistique-empirique, les chaussées suisses standards ne sont pas toutes adaptées aux conditions météorologiques futures par rapport à l'orniérage total.

Plus spécifiquement les régions présentant des températures plus élevées, telles que le Tessin et le Bassin Lémanique, sont sujettes à une augmentation importante de l'orniérage total entraînant des réductions importantes de la durée de vie des chaussées. D'autres régions non touchées par cette problématique risquent de l'être à moyen ou long terme.

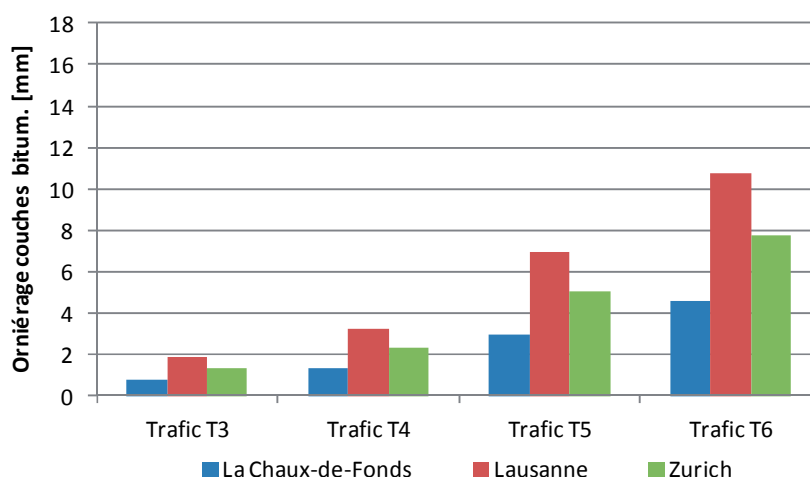
Les routes à trafic faible (T3, T4) ne présentent aucun cas où les valeurs limites de planéité transversale sont dépassées, que ce soit pour la période de référence ou la période à long-terme.

### **Orniérage des couches bitumineuses**

L'orniérage des couches bitumineuses présente des caractéristiques très semblables à l'orniérage total pour ce qui est du comportement de la profondeur d'ornières par rapport au trafic, au sol de fondation, au type de superstructure ou à la région climatique. Par contre l'impact du changement climatique, et principalement l'augmentation de la température associée, est plus marquée pour les couches bitumineuses. Ainsi des augmentations relatives de plus de 50% de la profondeur d'ornières sont observées pour plusieurs cas évalués. De même, l'orniérage des couches bitumineuses peut dépasser les valeurs limites de la profondeur d'ornières totale.

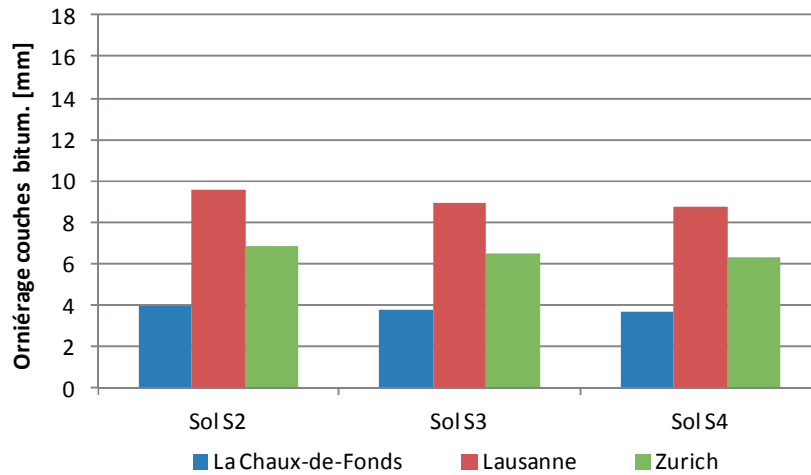
Plusieurs conclusions peuvent être tirées des évaluations effectuées :

- Trafic : L'évaluation indique de manière générale un orniérage des couches bitumineuses plus élevé pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.43). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières.



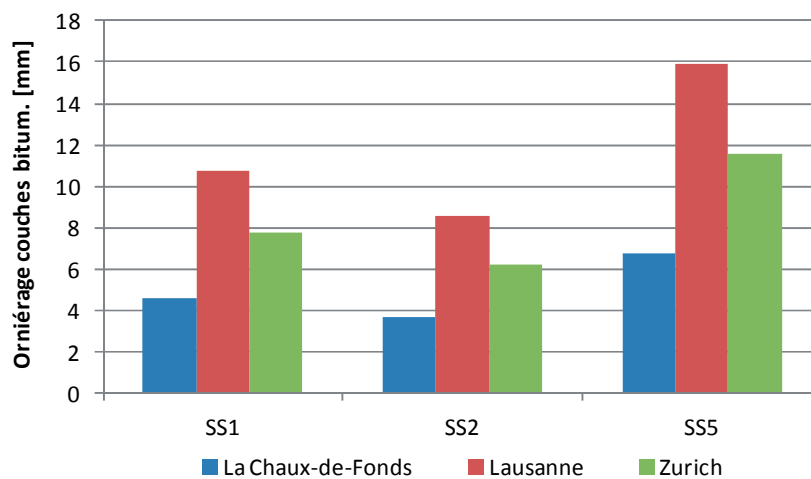
**Fig. 6.43** – Impact du trafic sur l'orniérage des couches bitumineuses (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Période de référence).

- Sol de fondation : L'orniérage des couches bitumineuses ne montre que très peu de différences entre les divers sols de fondation. Ainsi l'orniérage ne dépend que très peu de la classe de portance.



**Fig. 6.44** – Impact du sol de fondation sur l’orniéage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence).

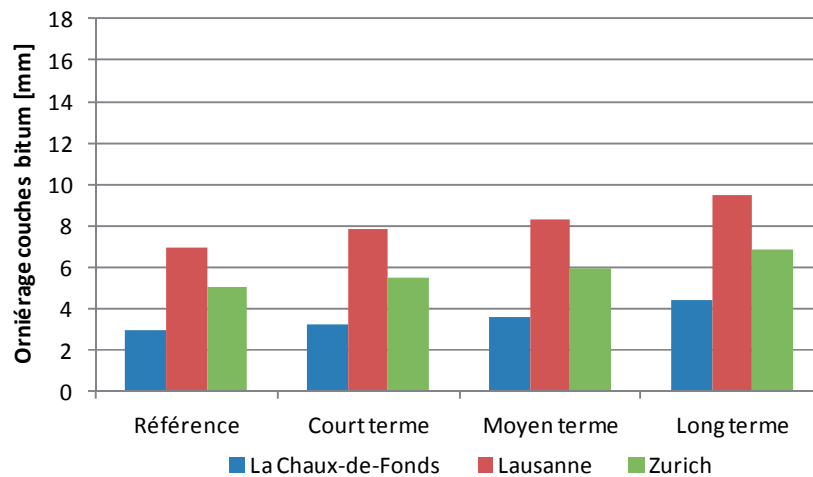
- Type de superstructure : De manière générale les structures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) présentent les profondeurs d’ornières des couches bitumineuses les plus élevées quelque soit le cas évalué (Fig. 6.45). Les structures de type 5 avec un trafic T6 présentent les profondeurs maximales d’orniéage.



**Fig. 6.45** – Impact du type de superstructure sur l’orniéage des couches bitumineuses (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence).

- Région climatique : L’orniéage des couches bitumineuses présente la même variabilité entre les différentes régions climatiques que l’orniéage total. Ainsi, les régions du Tessin (Lugano) et du Bassin Lémanique (Lausanne) présentent clairement les valeurs les plus élevées, alors que les régions du Jura (La Chaux-de-Fonds), du Valais à haute altitude (Simplon) et dans une moindre mesure du Plateau Ouest (Berne), présentent les valeurs les plus basses. Les autres sites se situent entre ces groupes extrêmes. Ceci est observé pour tous les cas évalués.

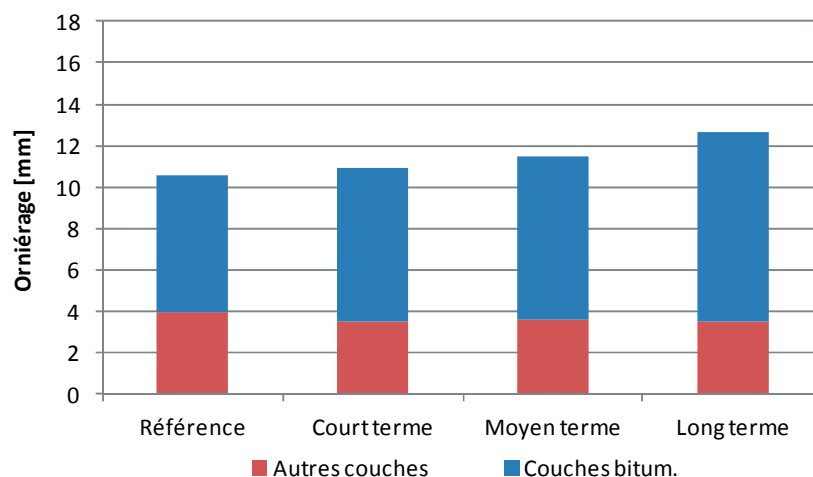
- Horizon d'analyse : En tenant compte du changement climatique, l'orniérage des couches bitumineuses a tendance à être plus élevé avec le temps pour la totalité des cas évalués (Fig. 6.46). L'augmentation est plus marquée que pour l'orniérage total, avec des augmentations pouvant dépasser les 50%. Les augmentations en valeurs absolues les plus élevées sont observées pour les régions du Bassin Lémanique (Lausanne) et du Tessin (Lugano). Des augmentations plus faibles touchent d'avantage les régions plus froides (Jura, Valais à haute altitude) et les régions du Plateau et des Préalpes. Les valeurs maximales de l'orniérage des couches bitumineuses se présentent pour l'horizon à long terme.



**Fig. 6.46** – Impact de l'horizon d'analyse sur l'orniérage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A2).

- Scénario climatique : A court et à moyen-terme, l'orniérage des couches bitumineuses ne présente que très peu de différences entre les scénarios climatiques évalués. A long-terme, la profondeur d'ornières est la plus élevée pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et la moins élevée pour le scénario B1 (intégré et écologique). Le scénario A1B (intégré) présente des valeurs intermédiaires aux deux autres scénarios.

Les augmentations des profondeurs d'ornières des couches bitumineuses sont très proches des augmentations de l'orniérage total. Ceci indique que l'impact du changement climatique touche principalement les couches bitumineuses (Fig. 6.47). L'on peut même constater une très légère diminution de l'orniérage des couches non-bitumineuses pour certains cas.



**Fig. 6.47** – Impact du changement climatique sur l'orniérage total et l'orniérage des couches bitumineuses (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Scénario climatique A2 ; Lausanne).

#### 6.4.4.2. Fissuration par fatigue

##### **Fissuration du bas vers le haut**

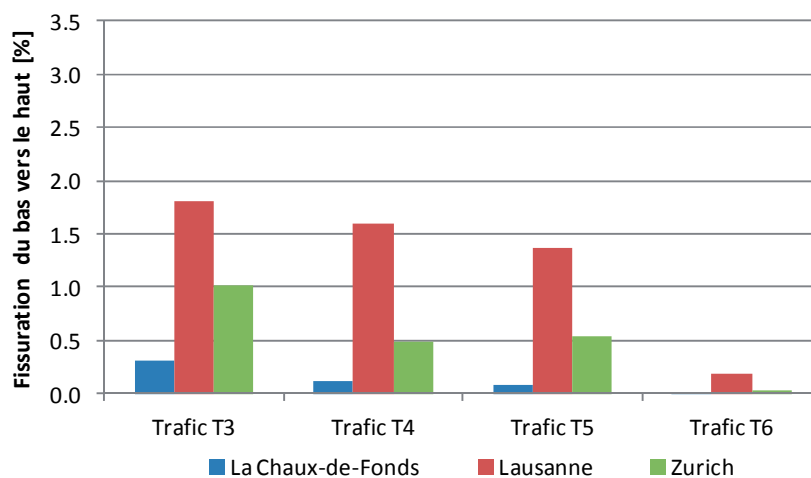
Dans le cas des structures routières suisse, il existe des valeurs limites par rapport à l'étendue et la gravité de la fissuration par fatigue du bas vers le haut (faïençage). La gravité est caractérisée par la profondeur des flaches associées : Gravité faible (S1) avec une profondeur inférieure à 15 mm ; Gravité moyenne (S2) avec une profondeur comprise entre 15 et 25 mm ; Gravité élevée (S3) avec une profondeur supérieure à 25 mm. L'étendue est caractérisée par le pourcentage de surface atteinte pour 100 m de voie : Etendue faible (A1) avec une surface inférieure à 10% ; Etendue moyenne (A2) avec une surface comprise entre 10 et 50% ; Etendue grave (A3) avec une surface supérieure à 50%.

L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose différentes valeurs limites selon le type de route considéré. Par exemple une fissuration inférieure à 5%, respectivement 10%, est adéquate pour les autoroutes, respectivement les routes principales et secondaires. La fissuration reste marginale pour des étendues inférieures à 20% pour les autoroutes et 40% pour les routes principales (valeurs de sécurité). Ces valeurs sont assez proches des valeurs limites proposées par les normes suisses.

De manière générale l'on peut constater que la fissuration du bas vers le haut ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. En effet, tous les cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (chaussée réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent une fissuration inférieure à 2% et ceci quelque soit le trafic, le sol de fondation, le type de superstructure ou la région climatique considéré. L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur la fissuration est très faible en valeurs absolus, la fissuration ne dépassant pas les 4% quelque soit le cas évalué (scénario climatique, horizon d'analyse).

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des évaluations effectuées :

- Trafic : L'évaluation indique de manière générale une fissuration du bas vers le haut plus faible pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.48). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières. Pour un trafic T6, la fissuration est inférieure à 0.7% pour tous les cas de référence évalués.



**Fig. 6.48** – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence).

- Sol de fondation : L'évaluation indique pour les structures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) une fissuration du bas vers le haut plus élevée pour les classes de portance supérieures (Fig. 6.49). Pour les autres types de superstructures aucune tendance nette n'est observée. Notons que le passage d'une classe de portance à une classe supérieure est associé à diminution de l'épaisseur des couches de fondation (grave, AC F, stabilisation) des structures routières.

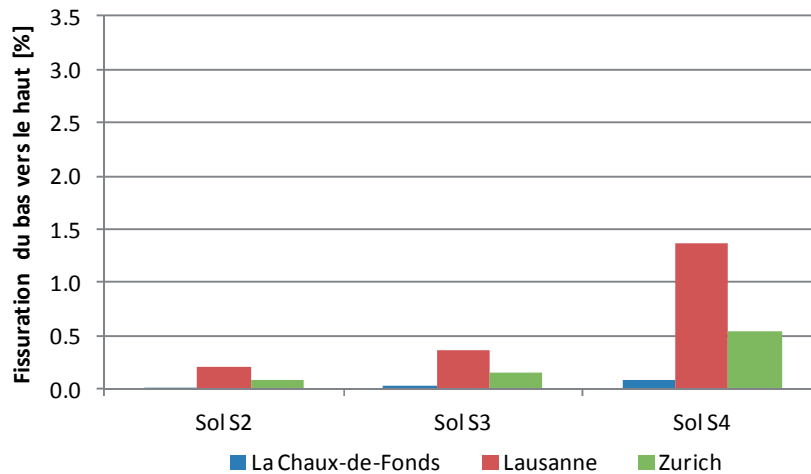


Fig. 6.49 – Impact du sol de fondation sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence).

- Type de superstructure : La fissuration du bas vers le haut est la plus élevée pour les structures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F). Le type de superstructure 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) ne présente aucune fissuration quelque soit le cas évalué. Les structures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) présentent des valeurs intermédiaires. Les structures de type 2 avec un sol de fondation de classe 4 présentent les fissurations les plus élevées quelque soit le cas évalué (Fig. 6.50).

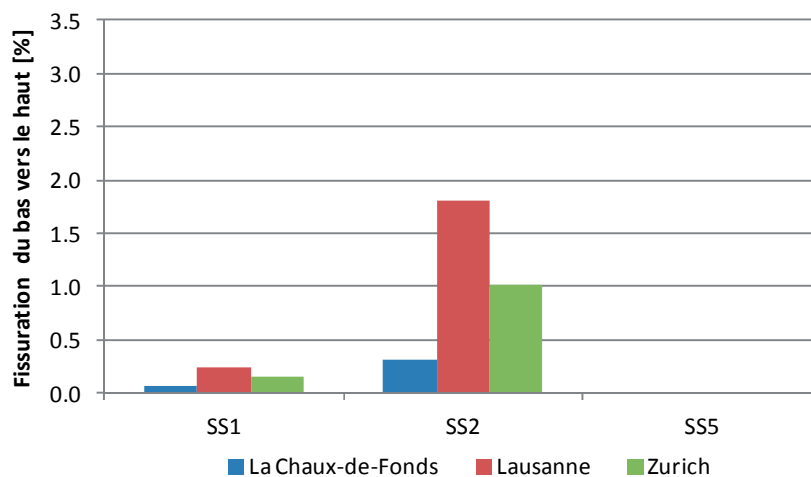
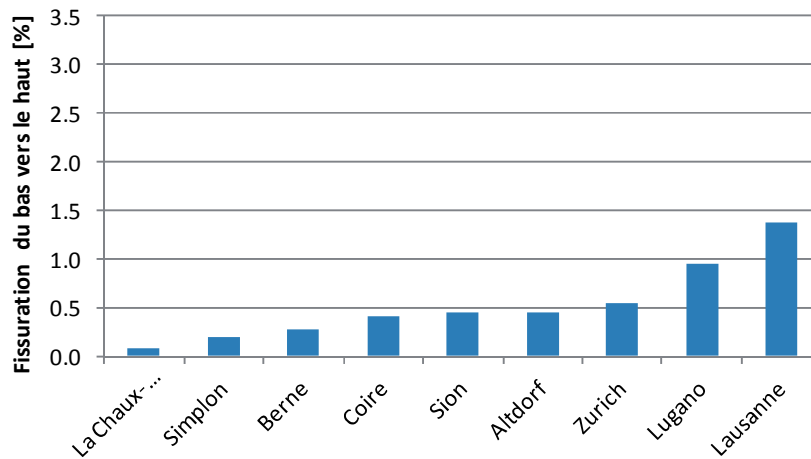


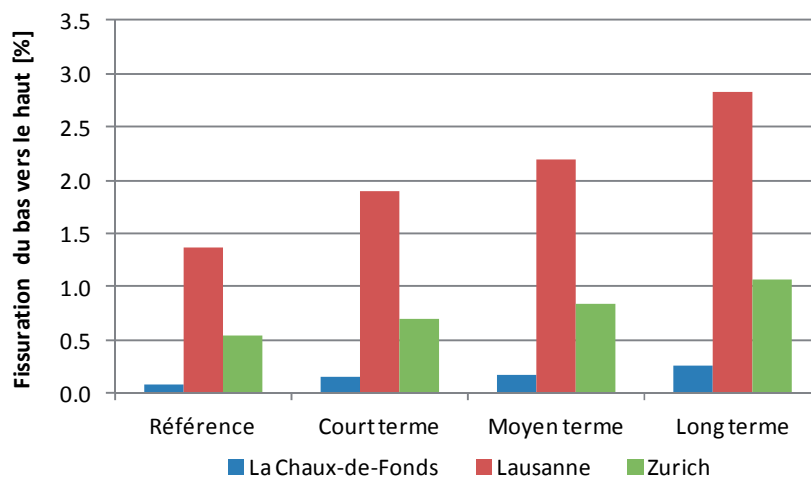
Fig. 6.50 – Impact du type de superstructure sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T3 ; Sol de fondation S4 ; Période de référence).

- Région climatique : La fissuration du bas vers le haut présente une faible variabilité entre les différentes régions climatiques. Ainsi, les régions du Tessin (Lugano) et du Bassin Lémanique (Lausanne) présentent les valeurs les plus élevées, pouvant atteindre 2% pour la période de référence, alors que les régions du Jura (La Chaux-de-Fonds) et du Valais à haute altitude (Simplon) présentent les valeurs les plus basses, ne dépassant pas les 1%. Les autres régions présentent des valeurs intermédiaires (Fig. 6.51).



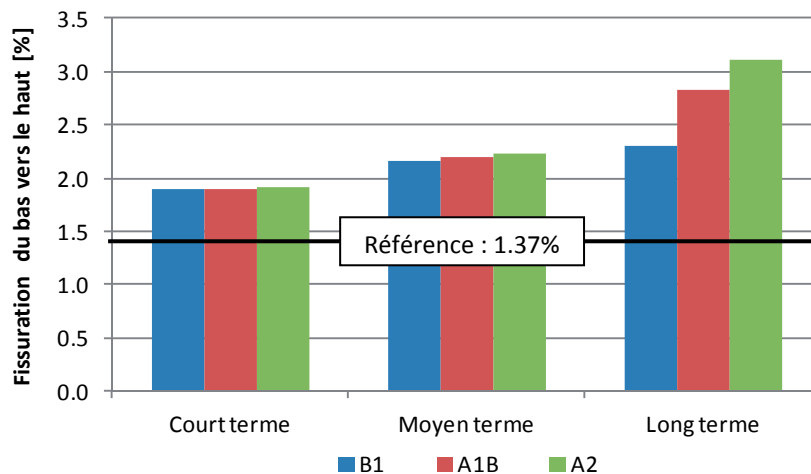
**Fig. 6.51** – Impact de la région climatique sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence).

- Horizon d'analyse : En tenant compte du changement climatique, la fissuration du bas vers le haut a tendance à être plus élevée avec le temps quelque soit le cas évalué. En effet une augmentation continue, faible en chiffres absolues (inférieure à 2%) mais très importantes en chiffres relatifs (max 56'000%), est observée pour les différents horizons d'analyse. Les valeurs maximales de la fissuration se présentent pour l'horizon à long-terme (Fig. 6.52).



**Fig. 6.52** – Impact de l'horizon d'analyse sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B).

- Scénario climatique : La fissuration du bas vers le haut est la plus élevée pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et la moins élevée pour le scénario B1 (intégré et écologique) quelque soit le cas évalué. La différence entre les scénarios reste néanmoins faible en chiffres absolues (inférieure à 1%). La différence est également la plus élevée pour un horizon d'analyse à long terme (Fig. 6.53).



**Fig. 6.53** – Impact du scénario climatique sur la fissuration par fatigue du bas vers le haut (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Lausanne).

La fissuration par fatigue du bas vers le haut ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. En effet, même en tenant compte du changement climatique, les valeurs limites de fissuration ne sont pas dépassées quelque soit le cas évalué. Ceci indique un dimensionnement suffisant des chaussées selon la méthode de dimensionnement SN 640 324b [114] et ceci pour n'importe quel type de trafic ou type de sol de fondation.

#### **Fissuration du haut vers le bas**

Dans le cas des structures routières suisses, il existe des valeurs limites par rapport à l'étendue et la gravité de la fissuration par fatigue du haut vers le bas (fissuration longitudinale). La gravité est caractérisée par la largeur de la fissure principale associée : Gravité faible (S1) avec une largeur inférieure à 2 mm ; Gravité moyenne (S2) avec une largeur comprise entre 2 et 10 mm ; Gravité élevée (S3) avec une largeur supérieure à 10 mm. L'étendue est caractérisée par la longueur des fissures pour 100 m de voie : Etendue faible (A1) avec une longueur inférieure à 5 m ; Etendue moyenne (A2) avec une longueur comprise entre 5 et 25 m ; Etendue grave (A3) avec une longueur supérieure à 25 m.

L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose différentes valeurs limites selon le type de route considéré. Par exemple une fissuration inférieure à 50 m/km, respectivement 100 m/km, est adéquat pour les autoroutes, respectivement les routes principales et secondaires. La fissuration reste marginale pour des longueurs inférieures à 200 m/km pour les autoroutes et 500 m/km pour les routes principales (valeurs de sécurité). Ces valeurs sont assez proches des valeurs limites proposées par les normes suisses.

De manière générale l'on peut constater que la fissuration du haut vers le bas correspond à une performance critique à long-terme des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. Actuellement tous les cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (chaussée réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent une fissuration inférieure à 30 m/km et ceci quelque soit le trafic, le sol de fondation, le type de superstructure ou la région climatique considéré. L'impact du changement climatique sur les



conditions météorologiques et sur la fissuration par contre peut être important. En effet, des fissurations proches des 100 m/km sont observées pour divers cas évalués (scénario climatique, horizon d'analyse).

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des évaluations effectuées :

- Trafic : L'évaluation indique pour la plupart des superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) une fissuration du haut vers le bas plus faible pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.54 – graphique de gauche). Pour un trafic T6, la fissuration est nulle ou très faible (inférieure à 1.5 m/km) pour ces cas. Pour certains cas la fissuration peut être plus élevée pour un trafic T4 ou T5 par rapport à un trafic T3 (p.ex. région du Bassin Lémanique (Lausanne), du Tessin (Lugano) et du Valais à basse altitude (Sion)). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières.

Pour les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques), l'évaluation indique une fissuration du haut vers le bas plus élevée pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.54 – graphique de droite). Pour un trafic T3 et T4, la fissuration est toujours nulle pour ces cas.

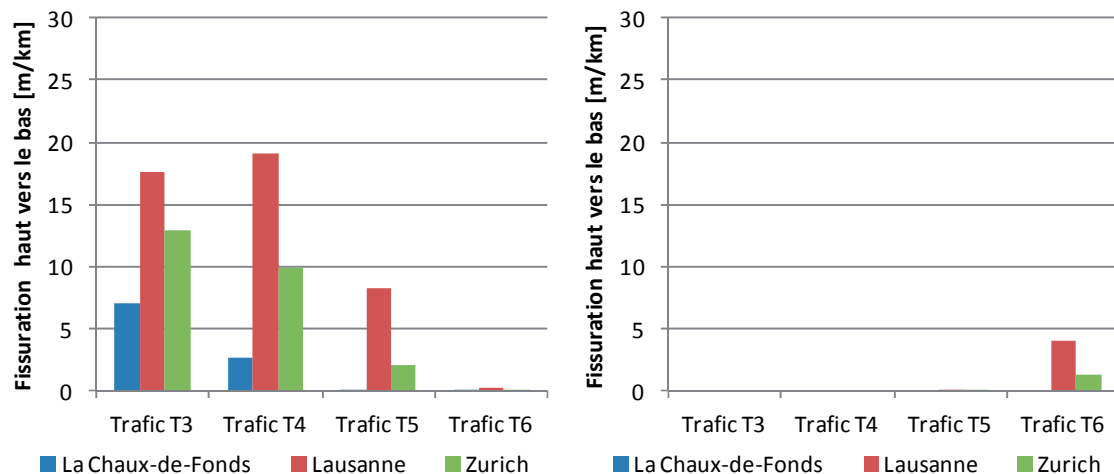


Fig. 6.54 – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence).

- Sol de fondation : L'évaluation indique pour la plupart des superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) une fissuration du haut vers le bas plus élevée pour les classes de portance supérieures (Fig. 6.55 – graphique de gauche). Pour certains cas la fissuration peut être plus faible pour un sol S4 par rapport à un sol S3 (p.ex. superstructures de type 2 dans la région du Jura (La Chaux-de-Fonds) ou du Valais à haute altitude (Simplon)). Notons que le passage d'une classe de portance à une classe supérieure est associé à diminution de l'épaisseur des couches de fondation (grave, AC F, stabilisation) des structures routières.

Pour les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques), une tendance inverse est constatée (fissuration plus faible pour les classes de portance supérieures) (Fig. 6.55 – graphique de droite).

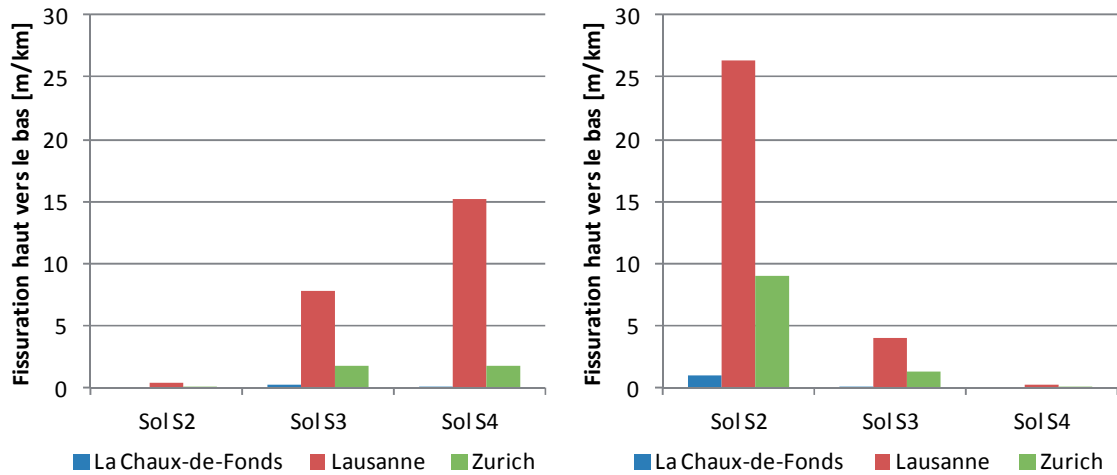


Fig. 6.55 – Impact du sol de fondation sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T4 (gauche) et T6 (droite) ; Type de superstructure 2 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence).

- Type de superstructure : De manière générale il n'existe pas de tendance nette par rapport au type de superstructure. En effet, en fonction du trafic et du sol de fondation, un type de superstructure peut présenter une fissuration du haut vers le bas plus élevée ou plus faible que les autres.

Pour un trafic élevé à très élevé (classes de trafic T5 et T6), la fissuration du haut vers le bas est de manière générale la plus élevée pour les structures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) (Fig. 6.56 – graphique de droite). Pour un trafic faible à moyen T3 à T4 la fissuration est de manière générale la plus élevée pour les structures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) (Fig. 6.56 – graphique de gauche). Pour un trafic de classes de trafic T3 et T4 la fissuration est nulle pour les structures de type 5. Les structures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) présentent des valeurs intermédiaires.

Les structures de type 1 avec un sol de fondation de classe 4 présentent les fissurations les plus élevées.

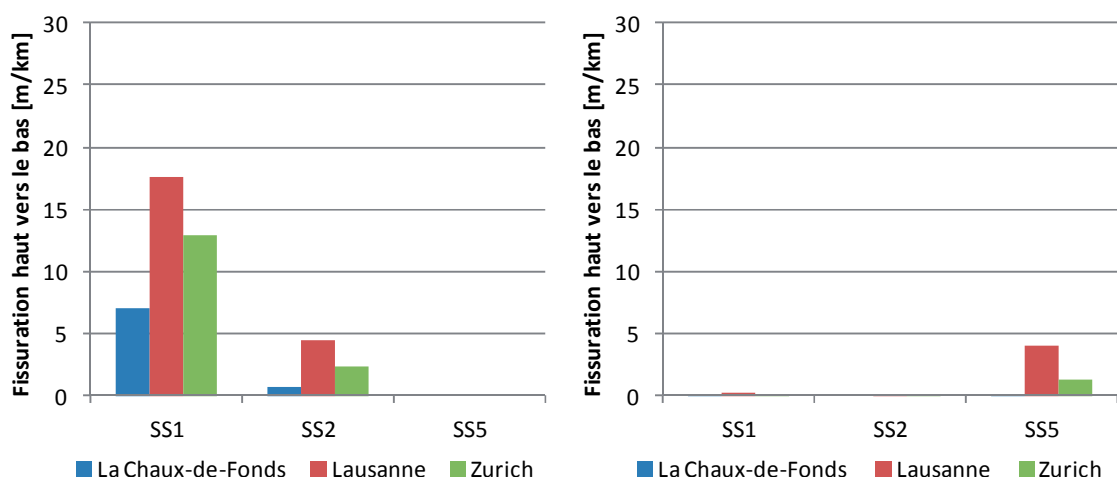
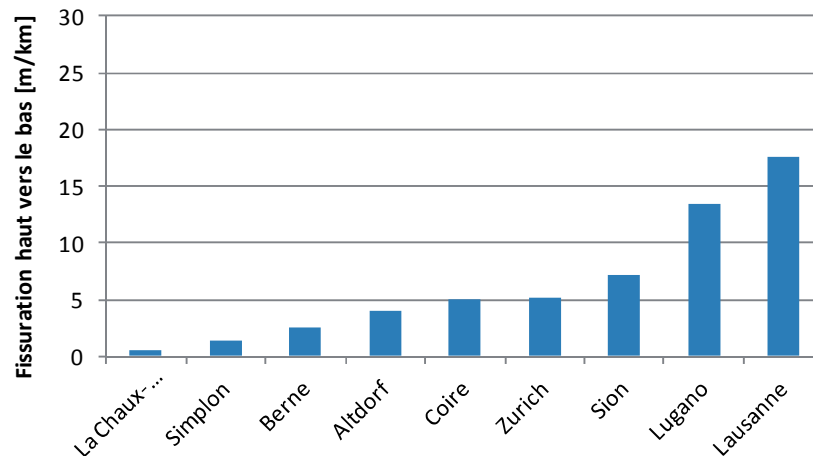


Fig. 6.56 – Impact du type de superstructure sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Période de référence).

- Région climatique : La fissuration du haut vers le bas présente une variabilité entre les différentes régions climatiques. Ainsi, les régions du Tessin (Lugano) et du Bassin Lémanique (Lausanne) présentent clairement les valeurs les plus élevées, alors que les régions du Jura (La Chaux-de-Fonds), du Valais à haute altitude (Simplon) et dans une moindre mesure du Plateau Ouest (Berne), présentent les valeurs les plus basses. Les autres sites se situent entre ces deux extrêmes. Ceci est vrai pour tous les cas évalués (Fig. 6.57).

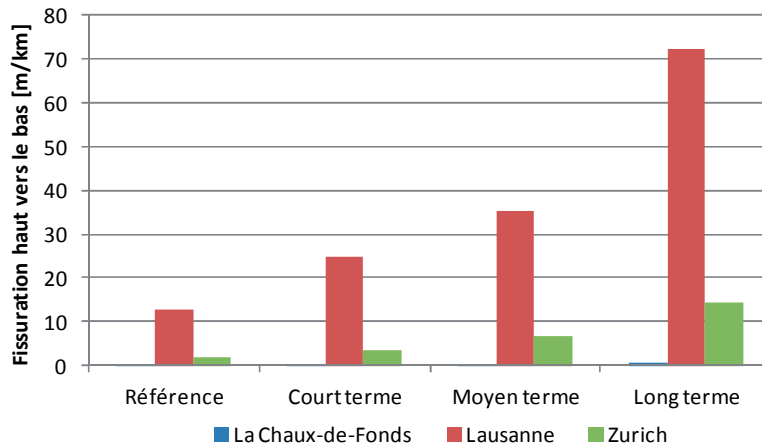


**Fig. 6.57** – Impact de la région climatique sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Période de référence).

- Horizon d'analyse : En tenant compte du changement climatique, de manière générale la fissuration du haut vers le bas a tendance à être plus élevée avec le temps pour la plupart des cas évalués (Fig. 6.58). Pour la région du Bassin Lémanique (Lausanne), certains cas peuvent présenter une faible diminution de la fissuration (superstructures de type 1 avec sols de fondation S2 ou S3 et trafic T3).

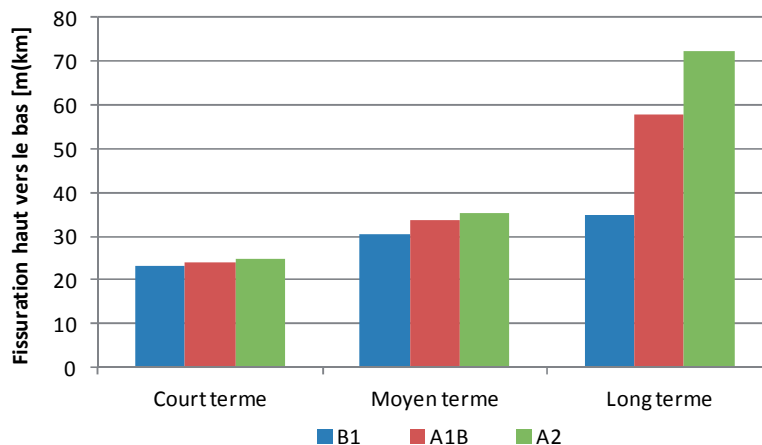
L'augmentation est différente selon le cas évalué. Dans la plupart des cas elle reste faible à très faible (inférieure à 20 m/km entre la période de référence et le période 2080-2100) pour toutes les superstructures. Néanmoins, certaines régions, telles que le Bassin Lémanique et le Tessin (Lugano), présentent des augmentations élevées pouvant atteindre les 70 m/km sur le long-terme.

Les augmentations en valeurs absolues les plus élevées sont observées pour les régions du Bassin Lémanique (Lausanne), du Tessin (Lugano) et du Valais à basse altitude (Sion). Des augmentations plus faibles touchent d'avantage les régions plus froides (Jura, Valais à haute altitude) et les régions du Plateau et des Préalpes. Les valeurs maximales de la fissuration se présentent pour l'horizon à long-terme.



**Fig. 6.58** – Impact de l’horizon d’analyse sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2).

- Scénario climatique : A court et à moyen-terme, la fissuration du haut vers le bas ne présente que très peu de différences entre les scénarios climatiques évalués. A long-terme, la fissuration est la plus élevée pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et la moins élevée pour le scénario B1 (intégré et écologique). Le scénario A1B (intégré) présente des valeurs assez proches du scénario A2 (Fig. 6.59).



**Fig. 6.59** – Impact du scénario climatique sur la fissuration par fatigue du haut vers le bas (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Lausanne).

Actuellement, la fissuration par fatigue du haut vers le bas ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards. En effet, les valeurs limites de fissuration selon les normes suisses ne sont actuellement pas dépassées quelque soit le cas évalué. Ceci indique un dimensionnement suffisant des chaussées selon la méthode de dimensionnement SN 640 324b [114] et ceci pour n’importe quel type de trafic ou type de sol de fondation. Par contre, le phénomène de changement climatique risque d’engendrer des fissurations plus importantes, au point où les valeurs limites de fissuration pourront être dépassées pour des routes à trafic élevé (T5 ou T6). Ainsi, selon la méthode mécanistique-empirique, les chaussées suisses standards ne sont pas adaptées aux conditions météorologiques futures par rapport à la fissuration par fatigue du haut vers le bas.

Plus spécifiquement, les régions présentant des températures plus élevées, telles que le Tessin, le Bassin Lémanique et la vallée du Rhône dans le Valais, sont sujettes à une augmentation importante de la fissuration entraînant des dépassements des valeurs limites. Ces valeurs limites peuvent être atteintes dans certains cas déjà pour l’horizon d’analyse 2050-2070 (moyen-terme).

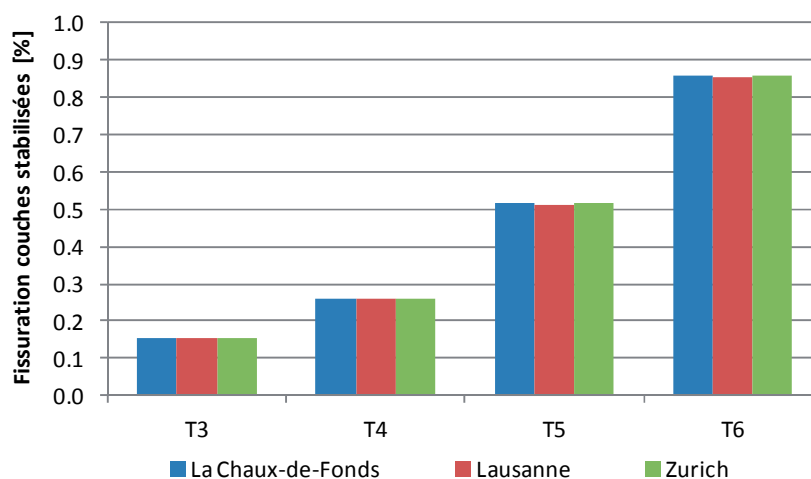
### **Fissuration dans les couches stabilisées (chaussées semi-rigides)**

La fissuration par fatigue dans les couches stabilisées peut apparaître dans les éventuelles couches stabilisées des chaussées semi-rigides (type de superstructure 5). Dans le cas des structures routières suisses, il n'existe pas de valeurs limites par rapport à l'étendue et la gravité de ces dégradations. L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose différentes valeurs limites selon le type de route considéré. Par exemple une fissuration inférieure à 5%, respectivement 10%, est adéquat pour les autoroutes, respectivement les routes principales et secondaires.

De manière générale l'on peut constater que la fissuration dans les couches stabilisées ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. En effet, tous les cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (chaussée réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent une fissuration inférieure à 1% et ceci quelque soit le trafic, le sol de fondation, le type de superstructure ou la région climatique considérée. L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur la fissuration est très faible quelque soit le cas évalué (scénario climatique, horizon d'analyse).

La fissuration dans les couches stabilisées ne dépend que très faiblement des conditions météorologiques. Ainsi il n'existe aucune différence notable entre les différentes régions climatiques ainsi qu'entre les différents horizons d'analyse et scénarios climatiques. De même, la fissuration dans les couches stabilisées ne dépend que très faiblement du sol de fondation. Ainsi il n'existe aucune différence notable entre les différents types de sol de fondation.

Le seul facteur ayant un faible impact sur la fissuration dans les couches stabilisées est le trafic. En effet l'évaluation indique de manière générale une fissuration plus élevée pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.60). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières.



**Fig. 6.60** – Impact du trafic sur la fissuration par fatigue dans les couches stabilisées (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence).

La fissuration par fatigue dans les couches stabilisées ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards. En effet, même en tenant compte du changement climatique, les valeurs limites de fissuration ne sont pas dépassées quelque soit le cas évalué. Ceci indique, selon les résultats de la méthode mécanistique-empirique, un dimensionnement suffisant des chaussées suisses selon la méthode de dimensionnement SN 640 324b [114] et ceci pour n'importe quel type de trafic ou type de sol de fondation.

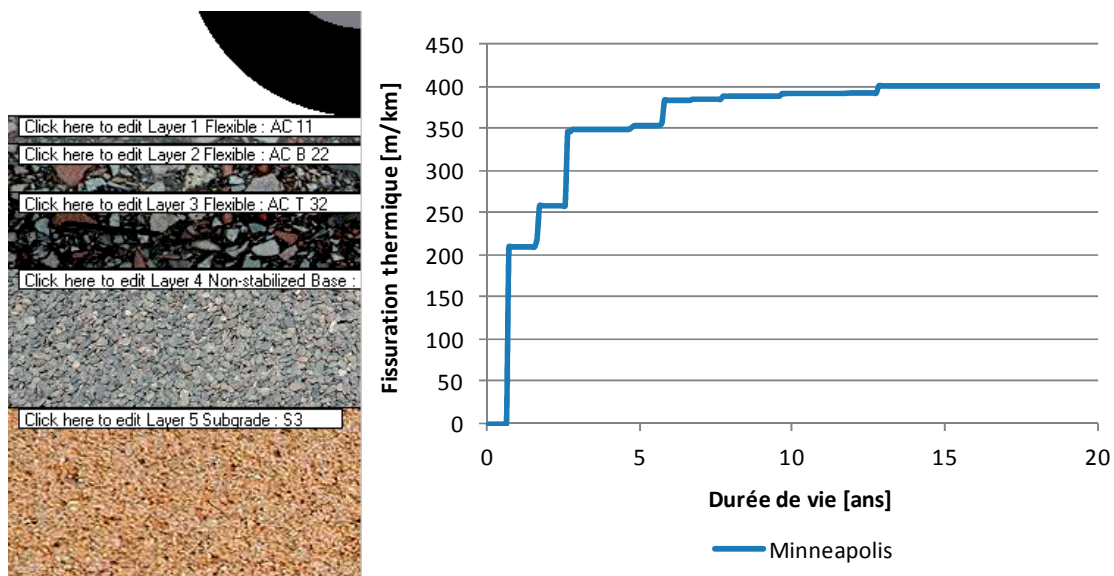
#### 6.4.4.3. Fissuration thermique

Dans le cas des structures routières suisses il n'existe aucun critère concernant des valeurs limites de fissuration thermique. L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose une valeur limite de longueur de fissures de 190 m/km.

Tous les cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (chaussée réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent une fissuration thermique nulle et ceci quelque soit le trafic, le sol de fondation, le type de superstructure ou la région climatique considéré. L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur la fissuration thermique est également nul. En effet, quelque soit le scénario climatique et l'horizon d'analyse considéré, la fissuration thermique demeure nulle pour tous les cas évalués.

La fissuration thermique ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards. Ceci est dû au fait que les conditions météorologiques suisses ne présentent pas de conditions de températures hivernales assez rudes. Ceci est également vrai pour le site du Simplon, site présentant les conditions hivernales les plus rudes (site appartenant à la région climatique du Valais – haute altitude).

Afin de contrôler le bon fonctionnement de l'outil de dimensionnement, des conditions météorologiques provenant du nord des Etats-Unis (Minneapolis, état du Minnesota) ont été appliquées à quelques cas de chaussées suisses. Minneapolis présente des hivers particulièrement rudes (températures minimales de  $-30^{\circ}\text{C}$ ) et des variations de températures importantes. Les résultats montrent clairement que les chaussées suisses ne seraient pas adaptées à ces conditions climatiques. En effet, des fissurations thermiques importantes sont obtenues, dépassant largement la valeur limite de 190 m/km proposée par l'outil. Cette valeur serait même dépassée après un seul hiver. Dans la figure ci-après est donné l'exemple d'une superstructure de type 1 avec un trafic T5 et un sol de fondation S3 par rapport aux conditions météorologiques de Minneapolis (Fig. 6.61).



**Fig. 6.61** – Comportement d'une chaussée standard suisse sous conditions météorologiques de la ville de Minneapolis.

#### 6.4.4.4. Performances fonctionnelles

Dans le cas des structures routières suisses, il n'existe pas de valeurs limites par rapport à la gravité de l'indice d'uni IRI (International Roughness Index). L'outil de dimensionnement DARWin-ME propose différentes valeurs limites selon le type de route considéré. Par exemple un IRI inférieure à 1.6 m/km, respectivement 1.75 m/km, est adéquat pour les autoroutes, respectivement les routes principales. Les performances fonctionnelles restent marginales pour des indices IRI inférieurs à 2.75 m/km pour les autoroutes et 3.15 m/km pour les routes principales (valeurs de sécurité). L'IRI initial a été choisi égal à 1 m/km pour tous les cas évalués.

De manière générale l'on peut constater que la rugosité des chaussées ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. Même si plusieurs cas de référence évalués selon les hypothèses et paramètres définis auparavant (chaussée réalisée en 1990 – Chapitre 6.4.3) présentent des indices IRI supérieurs ou proches des valeurs limites selon DARWin-ME (valeurs adéquates), ceux-ci restent toujours inférieurs aux valeurs de sécurité. L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur la rugosité des chaussées reste faible et peut se traduire aussi bien par une augmentation de l'indice que par une diminution de celui-ci. Des valeurs maximales absolues de l'indice de 2.2 m/km sont observées pour divers cas évalués (principalement pour les routes à trafic élevé (T5 ou T6)). Les augmentations ne dépassent pas les 10%.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des évaluations effectuées :

- Trafic : L'évaluation indique de manière générale un indice d'uni plus élevé pour les classes de trafic supérieures (Fig. 6.62). Notons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières.

Par rapport à la période de référence et pour les routes principales (trafic T3 ou T4), la valeur adéquate de 1.75 m/km n'est dépassée que pour certains cas isolés avec un trafic T4 (p.ex. pour la région du Bassin Lémanique (Lausanne) avec une superstructure de type 1 et un sol de fondation S2). Pour les autoroutes (trafic T5 ou T6), la valeur adéquate de 1.6 m/km est dépassée par tous les cas évalués, mais les indices restent toujours inférieures à la valeur de sécurité de 2.75 m/km.

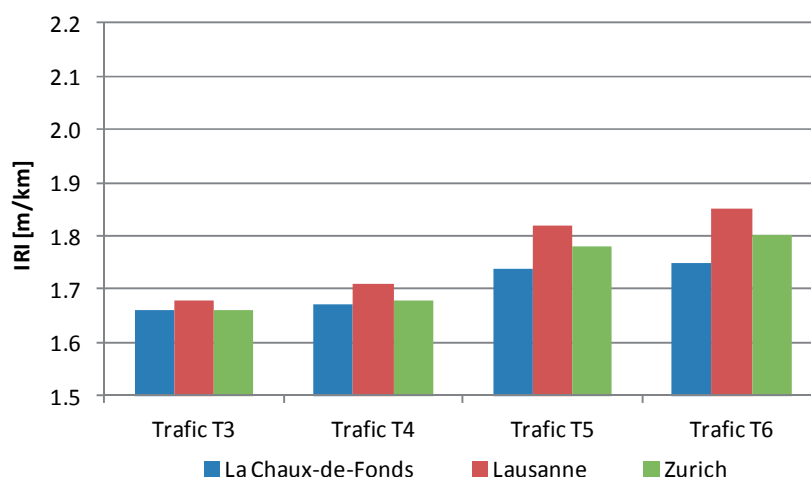


Fig. 6.62 – Impact du trafic sur l'indice d'uni IRI (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Période de référence).

- Sol de fondation : L'évaluation indique pour les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) un indice d'uni plus faible pour les classes de portance supérieures (Fig. 6.63 – graphique de gauche). Notons que le passage d'une classe de portance à une classe supérieure est associé à diminution de l'épaisseur des couches de fondation (grave, AC F, stabilisation) des structures routières.

Pour les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F), l'indice d'uni est légèrement plus élevé pour les sols de fondation S2, puis les sols de fondation S3 et S4 présentent des valeurs semblables et légèrement plus faibles (Fig. 6.63 – graphique de droite).

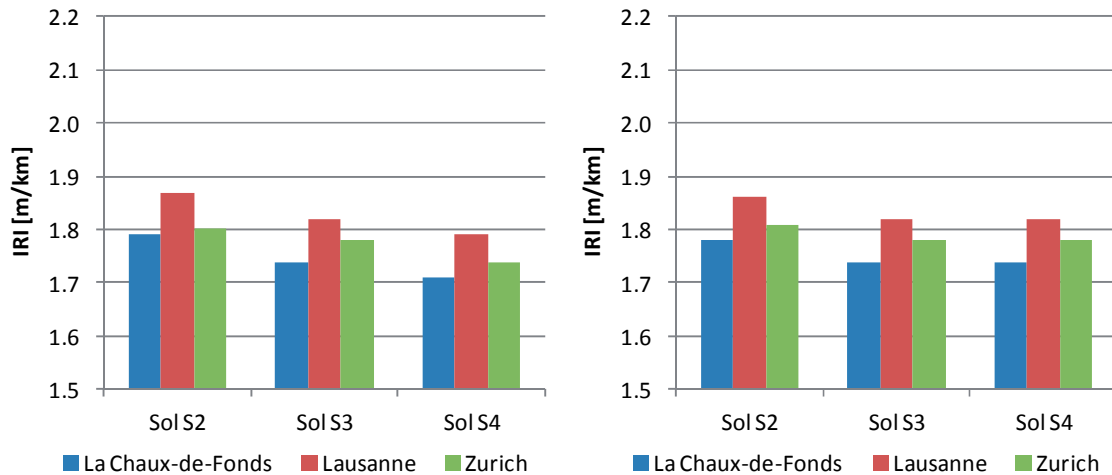


Fig. 6.63 – Impact du sol de fondation sur l'indice d'uni IRI (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence).

- Type de superstructure : De manière générale la variation entre les différents types de superstructure est très faible voir nulle.

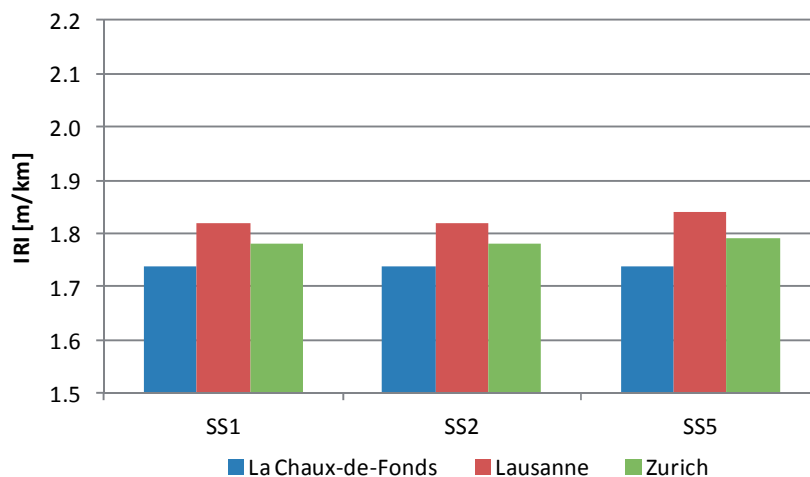
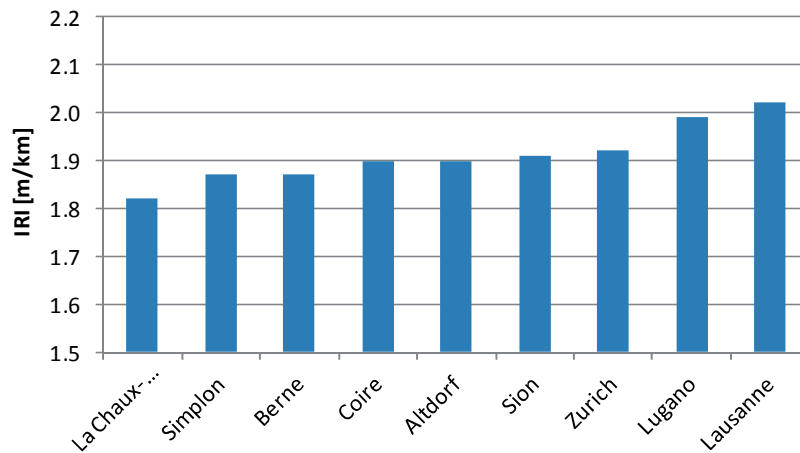


Fig. 6.64 – Impact du type de superstructure sur l'indice d'uni IRI (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence).

- Région climatique : L'indice d'uni IRI présente une faible variabilité entre les différentes régions climatiques. Pour un trafic faible, la variation est quasi-nulle, mais avec l'augmentation du trafic, des variations plus importantes sont observées. Pour un trafic T5 et T6, les régions du Tessin (Lugano) et du Bassin Lémanique (Lausanne) présentent les valeurs



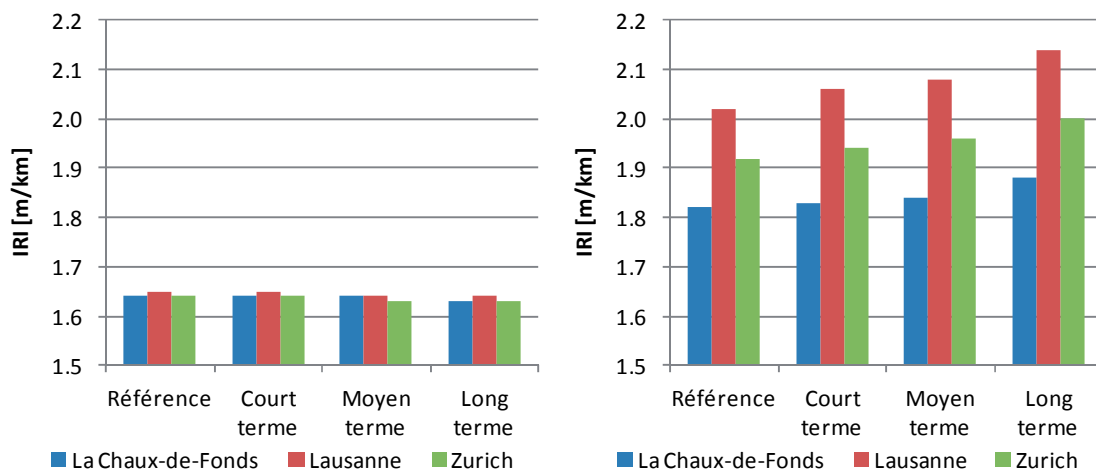
les plus élevées, alors que les régions du Jura (La Chaux-de-Fonds), et dans une moindre mesure du Valais à haute altitude (Simplon) et du Plateau Ouest (Berne), présentent les valeurs les plus basses. Les autres sites se situent entre ces deux groupes (Fig. 6.65).



**Fig. 6.65** – Impact de la région climatique sur l'indice d'uni IRI (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Période de référence).

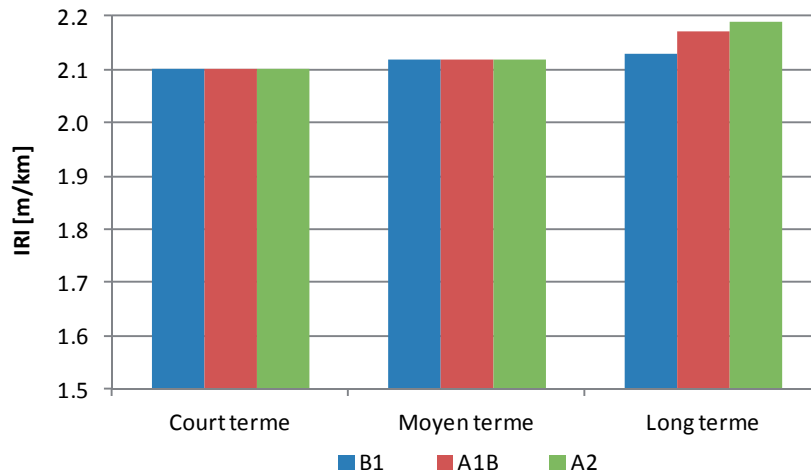
- Horizon d'analyse : En tenant compte du changement climatique, l'indice d'uni présente de manière générale une tendance à être plus élevée avec le temps pour les trafics élevés et très élevé (T5 et T6) et plus faible ou constant pour les trafics faibles et moyens (T3 et T4) (Fig. 6.66). Pour un trafic T3, tous les cas évalués présentent une faible diminution de l'indice d'uni atteignant au maximum 2.5% pour la période 2080-2100. Il n'existe que très peu de différences entre tous ces cas analysés. Pour un trafic T4, la diminution est encore plus faible (inférieure à 1.5% pour la période 2080-2100) ou nulle (tendance constante).

Pour un trafic T5, tous les cas évalués présentent une faible augmentation de l'indice d'uni atteignant au maximum 3.5% pour la période 2080-2100. Il n'existe que très peu de différences entre tous ces cas analysés, mais la région du Bassin Lémanique (Lausanne) présente des valeurs légèrement plus élevées que les autres régions. Pour un trafic T6, l'augmentation est plus forte (maximum de 6.3% pour la période 2080-2100) avec des valeurs plus élevées pour les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) (Fig. 6.66 – graphique de droite).



**Fig. 6.66** – Impact de l'horizon d'analyse sur l'indice d'uni IRI (Trafic T3 (gauche) et T6 (droite) ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 5 ; Scénario climatique A2).

- Scénario climatique : L'indice d'uni ne présente que très peu de différences entre les scénarios climatiques évalués pour la plupart des cas évalués. Uniquement les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) et avec un trafic T6 présentent à long terme une légère variation avec des indices plus élevés pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et moins élevés pour le scénario B1 (intégré et écologique). Le scénario A1B (intégré) présente des valeurs intermédiaires (Fig. 6.67).



**Fig. 6.67** – Impact du scénario climatique sur l'indice d'uni IRI (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Lausanne).

La rugosité des chaussées ne correspond pas à une performance critique des chaussées suisses standards sur les routes à trafic élevé. En effet, même en tenant compte du changement climatique, les valeurs de sécurité de l'indice IRI ne sont pas dépassées quelque soit le cas évalué. Ceci indique, selon la méthode mécanistique-empirique, un dimensionnement suffisant des chaussées selon la méthode de dimensionnement SN 640 324b [114] et ceci pour n'importe quel type de trafic ou type de sol de fondation.

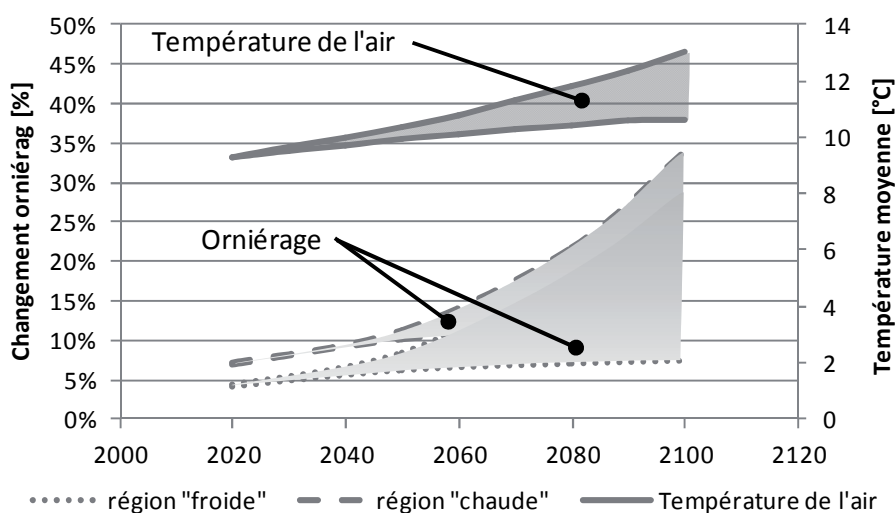
Pour un trafic T3 et T4, les valeurs adéquates de l'indice d'uni sont dépassées uniquement dans certains cas isolés (superstructure de type 1 avec trafic T4 et sol de fondation S2) et ceci de manière très faible (valeur maximale de 1.77 m/km). Le phénomène de changement climatique n'a pour ces cas aucun impact (tendance constante, voir négative).

#### 6.4.4.5. Résumé des impacts majeurs

La méthode de dimensionnement mécanistique-empirique permet d'évaluer l'impact d'un changement quelconque du climat sur les performances des chaussées. Grâce à l'utilisation de données météorologiques horaires, une analyse détaillée du comportement des chaussées sous différents climats est possible. Dans les chapitres ci-avant (Chapitres 6.4.4.1 à 6.4.4.4), les performances principales des chaussées ont été analysées. Plusieurs conclusions ont pu être tirées de ces évaluations, dont les plus importantes sont :

- Performances critiques : Selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique il existe deux performances critiques pour les chaussées standards suisses : Il s'agit de l'orniérage et de la fissuration par fatigue du haut vers le bas. Ces performances présentent plusieurs cas où les valeurs limites selon les normes suisses sont dépassées pour des conditions météorologiques actuelles et/ou pour des conditions météorologiques futures sous différents scénarios climatiques et à différents horizons d'analyse.

Le changement climatique engendre une augmentation des profondeurs d'ornières, principalement fonctions de la région climatique et du régime de trafic. Ainsi pour un trafic T3, l'augmentation reste inférieure à 13% entre la période de référence et le long-terme (période 2080-2100), alors que pour un trafic T6, celle-ci peut atteindre les 33% (Fig. 6.68). Pour un trafic élevé (T5 ou T6) plusieurs cas sont observés où les valeurs limites ne sont pas dépassées pour la période de référence, mais où ces valeurs seront dépassées à court, moyen ou long-terme. En même temps plusieurs cas (principalement pour les régions du Bassin Lémanique (Lausanne) et du Tessin (Lugano) avec un trafic élevé T5 ou très élevé T6) sont observés où les valeurs limites sont déjà dépassées pour la période de référence. Pour un trafic faible T3 ou moyen T4 aucun cas n'est observé où les valeurs limites sont dépassées, que ce soit pour la période de référence ou pour la période à long-terme. L'augmentation des profondeurs d'ornières est presque intégralement due à une augmentation de l'orniérage des couches bitumineuses.



**Fig. 6.68** – Impact du changement climatique sur l'orniérage total pour tous les cas confondus avec changement de la température de l'air (Trafic T6).

Le changement climatique engendre une augmentation des longueurs des fissures par rapport à la fissuration par fatigue du haut vers le bas. Cette augmentation est principalement fonction de la région climatique. Ainsi dans la plupart des cas l'augmentation reste faible à très faible (inférieure à 20 m/km entre la période de référence et le période 2080-2100). Néanmoins, certaines régions, telles que le Bassin Lémanique (Lausanne) et le Tessin (Lugano), présentent des augmentations élevées pouvant atteindre les 70 m/km. Plusieurs cas sont observés où les valeurs limites ne sont pas dépassées pour la période de référence, mais où ces valeurs seront dépassées à moyen ou à long-terme. Par contre aucun cas où les valeurs limites sont déjà dépassées pour la période de référence n'est observé.

- Autres performances : La fissuration par fatigue du bas vers le haut montre également une augmentation de l'étendue de la fissuration à cause du changement climatique, mais celle-ci reste très faible par rapport aux valeurs limites prescrites selon les normes suisses. La fissuration par fatigue des couches stabilisées ne montre elle qu'un impact très faible au changement climatique. La fissuration thermique par contre ne montre aucun impact. L'impact du changement climatique sur les performances fonctionnelles (indice d'uni IRI) se présente soit par une faible augmentation, soit par un comportement constant, soit par une très faible diminution de la rugosité.

- Régions climatiques : Selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique il existe trois grandes régions climatiques pour les chaussées standards suisses : Une région "chaude" caractérisée par des températures de l'air élevées, une région "intermédiaire" caractérisée par des températures de l'air moyennes et une région "froide" caractérisée par des températures de l'air faibles. Ces régions présentent des différences importantes par rapport à leur comportement vis-à-vis des conditions météorologiques.

La région "chaude" se compose des régions du Tessin et du Bassin Lémanique. Il s'agit de la région la plus critique avec un impact important du changement climatique sur ses performances. Par rapport aux performances critiques associées, les valeurs limites selon les normes suisses sont dépassées pour des conditions météorologiques actuelles et/ou pour des conditions météorologiques futures sous différents scénarios climatiques et à différents horizons d'analyse.

La région "froide" se compose des régions du Jura et du Valais à haute altitude. Il s'agit de la région la moins critique avec un impact faible du changement climatique sur ses performances. Par rapport aux performances critiques associées, les valeurs limites selon les normes suisses ne sont que rarement dépassées pour des conditions météorologiques futures sous différents scénarios climatiques et à différents horizons d'analyse.

La région "intermédiaire" se compose des régions restantes, principalement du Plateau suisse. Il s'agit d'une région avec un impact moyen du changement climatique sur ses performances. Par rapport aux performances critiques associées, les valeurs limites selon les normes suisses sont pour certains cas dépassées pour des conditions météorologiques actuelles et/ou pour des conditions météorologiques futures sous différents scénarios climatiques et à différents horizons d'analyse.

Selon la méthode mécanistique-empirique, le dimensionnement des chaussées standards suisses selon la méthode actuelle est suffisant pour la région "froide". Pour la région "intermédiaire" des adaptations sont recommandés pour certains cas (p. ex. à trafic élevé) et pour la région "chaude" des adaptations à plus grande échelle sont nécessaires.

- Scénarios climatiques et horizons d'analyse : Les différences entre les trois scénarios climatiques et les horizons d'analyse peuvent être importantes. Le scénario modéré (scénario B1) présente toujours l'impact le plus faible et le scénario extrême (scénario A2) l'impact le plus élevé.

Les différences entre les scénarios augmentent dans le temps, ainsi les différences maximales sont atteintes pour la période d'analyse à long-terme (période 2080-2100). Par rapport à l'orniérage les différences entre la période de référence et le court-terme restent faibles avec des valeurs inférieures à 10% (comparées aux 28% maximaux pour le long-terme – scénario A2). A long-terme les différences entre les deux scénarios extrêmes (B1 et A2) peuvent atteindre les 15% pour l'orniérage total.

- Type de superstructure et trafic : De manière générale, les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) résistent mieux aux impacts du changement climatique pour des routes à faible ou moyen trafic (T3 ou T4). Les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) résistent par contre mieux pour des routes à trafic élevé ou très élevé (T5 ou T6). Les superstructures de type 2 présentent souvent un comportement intermédiaire aux deux autres types.

Selon la méthode mécanistique-empirique, les routes à faible ou moyen trafic (T3 ou T4) sont dimensionnées de manière à résister au phénomène de changement climatique. En effet, tous les cas évalués présentent des durées de vie supérieures à 20 ans par rapport aux performances structurelles. Uniquement l'indice d'uni est dépassé très faiblement pour certains cas isolés.

Le phénomène de changement climatique aura un impact non négligeable sur les performances des chaussées standards à trafic élevé en Suisse. Sans adaptation de la méthode actuelle de dimensionnement des chaussées ou des matériaux utilisés, on risque d'assister à une détérioration du réseau routier suisse et ceci déjà dans un futur assez proche (chaussées réalisées en 2020).

Afin de prévenir au maximum l'apparition de dégradations dangereuses pour les utilisateurs, une analyse de risque, basée sur une évaluation de la durée de vie des chaussées, est proposée dans le chapitre suivant (Chapitre 7). Celle-ci permettra également de donner des recommandations pour une adaptation du réseau routier suisse aux futures conditions météorologiques.



## 7. ANALYSE DE RISQUE ET MESURES D'ADAPTATION

Une analyse de risque, basée sur les durées de vie des chaussées, a été effectuée afin de mieux apprécier l'impact du changement climatique sur les chaussées et de proposer des mesures d'adaptation à ce phénomène. Pour ce faire une méthodologie spécifique a été mise au point, celle-ci est décrite dans la première partie du chapitre (Chapitre 7.1). Par la suite les résultats principaux de l'analyse de durée de vie (Chapitre 7.2) et de l'analyse de risque (Chapitre 7.3) sont présentés. Finalement les mesures d'adaptation contre le changement climatique sont exposées (Chapitre 7.4).

### 7.1. Méthodologie générale

Une méthodologie générale d'analyse de durée vie et de risque des chaussées a été mise au point dans le cadre de la thèse. Cette méthodologie est divisée en quatre étapes principales (Chapitres 7.1.1 à 7.1.4) :

- Etape 1 – Définition du contexte climatique et des paramètres d'évaluation : Evaluation des conditions météorologiques actuelles et futures à l'aide d'un modèle climatique de pronostic ; Choix des paramètres d'évaluation liés aux conditions climatiques (régions climatiques, scénarios climatiques, etc.) et des paramètres liés aux structures routières (trafic, sol, matériaux, etc.) ; Choix des performances critiques des chaussées.
- Etape 2 – Evaluation de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées : Analyse de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées définies préalablement à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME.
- Etape 3 – Evaluation de la durée de vie des chaussées et analyse de risque : Définition des seuils de performances ; Analyse de la durée de vie des chaussées à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME ; Analyse du risque liée à la réduction des durées de vie des chaussées par rapport au phénomène de changement climatique ; Définition de facteurs de risque des chaussées et mise au point de typologies représentatives (régions à risque, chaussées à risque, etc.).
- Etape 4 – Mesures d'adaptation contre le changement climatique : Proposition de mesures d'adaptation contre le changement climatique afin d'améliorer les durées de vie des chaussées ; Evaluation de l'impact de chaque mesure sur la durée de vie des chaussées à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME et définition de son facteur de risque correspondant.

Un schéma de la méthodologie générale est donné dans la figure ci-après (Fig. 7.1).

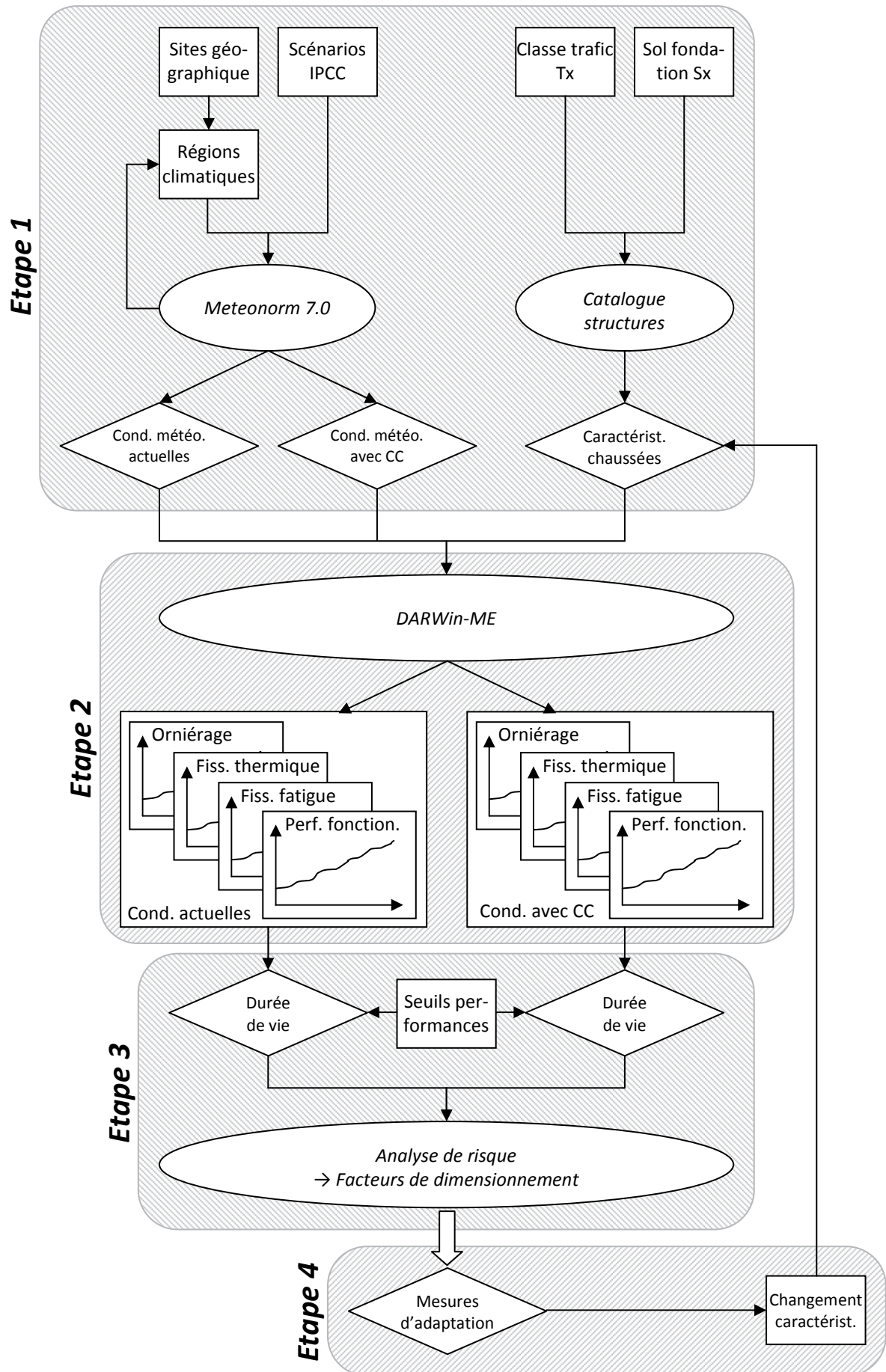


Fig. 7.1 – Schéma de l'analyse de risque.



### 7.1.1. Etape 1 : Définition du contexte climatique et des paramètres d'évaluation

Dans le cadre de la thèse, uniquement le contexte climatique suisse est analysé. Dans un premier temps un site géographique quelconque est classé selon les différentes régions climatiques suisses définies préalablement (Chapitre 5.1). Pour chaque région, le modèle climatique de pronostic (Meteonorm 7.0 – voir Chapitre 5.1) permet de déterminer les paramètres météorologiques horaires (températures, précipitations, radiations solaires, vitesses du vent et humidité relative) nécessaires.

Les paramètres météorologiques sont générés, pour différents scénarios IPCC intégrés dans le modèle (Chapitre 5.1), jusqu'à un horizon à long-terme (2100) et pour les différentes régions climatiques. De même, les paramètres météorologiques de référence (1960 à 1990) pour les différents cas sont extraits de la base de données du modèle. La période de référence permet de procéder à une comparaison entre les conditions météorologiques actuelles et futures.

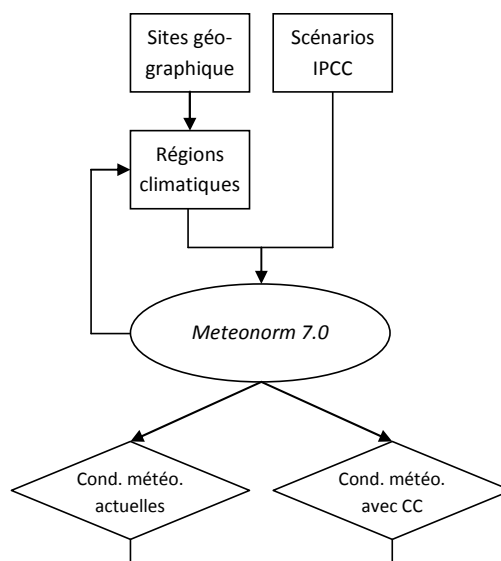


Fig. 7.2 – Schéma de l'analyse de durée de vie et de l'analyse de risque – Etape 1 (1/2).

L'analyse générale de l'impact du changement climatique sur les chaussées standards suisses a permis de restreindre le nombre de régions climatiques présentant des comportements des chaussées distincts (Chapitre 6.4.4.5). Ainsi, trois grandes régions climatiques ont été détectées :

- Région "chaude" : Région qui se compose des régions du Tessin et du Bassin Lémanique et présentant un impact important du changement climatique sur les performances des chaussées. Le site de Lausanne a été choisi comme site représentatif de cette région.
- Région "froide" : Région qui se compose des régions du Jura et du Valais à haute altitude et présentant un impact faible du changement climatique sur les performances des chaussées. Le site de La Chaux-de-Fonds a été choisi comme site représentatif de cette région.
- Région "intermédiaire" : Région qui se compose des régions restantes, principalement du Plateau suisse, présentant un impact moyen du changement climatique sur les performances des chaussées. Le site de Zurich a été choisi comme site représentatif de cette région.

Par rapport aux scénarios climatiques, les trois scénarios pris en compte dans l'analyse générale de l'impact du changement climatique sur les chaussées (Chapitre 6.4) ont été reconduits pour l'analyse de risque et l'évaluation des mesures d'adaptation :

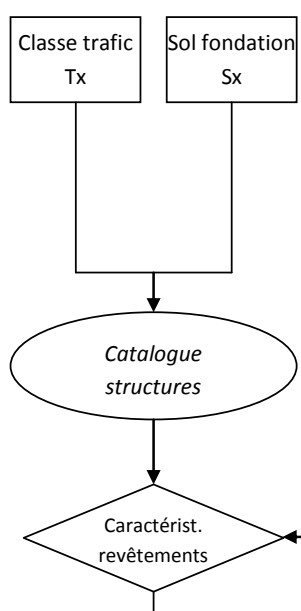
- Scénario B1 : Scénario modéré présentant un impact faible du changement climatique sur les performances des chaussées.
- Scénario A1B : Scénario moyen présentant un impact moyen du changement climatique sur les performances des chaussées.
- Scénario A2 : Scénario extrême présentant un impact important du changement climatique sur les performances des chaussées.

La prise en compte des trois scénarios climatiques a permis d'avoir une meilleure représentabilité statistique des résultats par rapport aux caractéristiques climatiques.

Par rapport aux différentes périodes d'analyses, toutes les périodes évaluées dans l'analyse générale de l'impact du changement climatique (Chapitre 6.4) ont été reprises :

- Référence : Chaussée réalisée en 1990 ; Période de référence.
- Court-terme : Chaussée réalisée en 2020 ; Période présentant un impact faible du changement climatique sur les performances des chaussées.
- Moyen-terme : Chaussée réalisée en 2050 ; Période présentant un impact moyen du changement climatique sur les performances des chaussées.
- Long-terme : Chaussée réalisée en 2080 ; Période présentant un impact important du changement climatique sur les performances des chaussées.

Concernant les paramètres d'évaluation liés aux structures routières, ceux-ci découlent d'un côté du trafic et de l'autre côté de la portance du sol de fondation. Le trafic est choisi selon les classes de trafic Tx et le sol de fondation selon les classes de portance du sol Sx. Ces classes sont issues de la norme de dimensionnement SN 640 324b (2010) [114].



**Fig. 7.3** – Schéma de l'analyse de durée de vie et de l'analyse de risque – Etape 1 (2/2).

Dans l'analyse de risque et l'évaluation des mesures d'adaptation, les sols avec une portance moyenne à très élevée (classes S2 à S4) et les régimes de trafic élevés à extrêmement lourds (T5 et T6), sont évalués. Les paramètres pris en considération (p.ex. TJM, facteur de croissance du trafic, vitesse de conduite, caractéristiques des sols) se basent sur des données de mesure réelles et sur des données issues des statistiques routières suisses. Les détails concernant les paramètres choisis peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.3.1).

L'analyse générale de l'impact du changement climatique sur les chaussées standards suisses a permis de montrer que les régimes de trafic faible à moyen (T3 et T4) ne sont pas critiques (Chapitre 6.4.4.5). Ces régimes sont donc uniquement évalués de manière succincte.

Plusieurs types de chaussées souples sont évalués. Il s'agit des superstructures de type 1, 2 et 5. Ces types sont obtenus à l'aide du catalogue des types de structures [114]. Les détails concernant les différents types de superstructure choisis peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.3.1).

Des caractéristiques moyennes sont choisies pour les caractéristiques des matériaux (caractéristiques des liants, courbes granulométriques, caractéristiques des enrobés, etc.). L'évaluation globale se fait à grade de liant égal, i.e. le même grade de liant est retenu comme référence pour les trois régions climatiques.

Les caractéristiques des matériaux sont basées sur des résultats d'essais effectués au LAVOC (base de données des matériaux) et des bases de données externes (laboratoires routières, fabricants d'enrobé, etc.). Un aperçu de ces caractéristiques est donné en annexe (Annexe 10.3.1).

L'analyse générale de l'impact du changement climatique sur les chaussées a permis de restreindre le nombre de performances critiques (Chapitre 6.4.4.5). Ainsi, deux performances présentent plusieurs cas où les valeurs limites selon les normes suisses sont dépassées pour des conditions météorologiques actuelles et/ou pour des conditions météorologiques futures. Il s'agit de l'orniérage et de la fissuration par fatigue du haut vers le bas.

L'orniérage présente une multitude de cas critiques quelques soit la classe de portance du sol de fondation ou le type de superstructure. Par contre, uniquement les routes à trafic élevé sont touchées. La fissuration du haut vers le bas présente uniquement quelques cas critiques. L'orniérage est clairement la performance la plus critique.

Lors de l'étape d'adaptation des caractéristiques des chaussées pour lutter contre le phénomène climatique, les performances non critiques sont également évaluées afin de vérifier que celles-ci ne deviennent pas critiques à leur tour. En effet, le changement de certaines caractéristiques des chaussées (p.ex. changement des épaisseurs), peut avoir une influence non négligeable sur ces autres performances. Il s'agit en premier lieu de la fissuration par fatigue du bas vers le haut et de la fissuration par fatigue des couches stabilisées.

Les valeurs limites choisies pour l'analyse de durée de vie et l'analyse de risque sont issues de la norme suisse SN 640 925b (2003) [135] ainsi que des recommandations DARWin-ME :

- Orniérage total : Profondeur d'ornières limite de 15 mm pour les routes à grand débit (trafic T5 et T6) selon la norme SN 640 925b (2003) [135] (indice de dégradation de surface  $I_1$ ).
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Longueur des fissures limite de 50 m/km pour les routes à grand débit (trafic T5 et T6) selon la norme SN 640 925b (2003) [135].
- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Etendue des fissures limite de 5% pour les routes à grand débit (trafic T5 et T6) selon la norme SN 640 925b (2003) [135].
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées (uniquement pour les superstructures de type 5) : Etendue des fissures limite de 5% pour les routes à grand débit (trafic T5 et T6) selon les recommandations DARWin-ME.

L'indice d'uni IRI n'a pas été retenu du fait du caractère fonctionnel et non structural de l'indice. En outre, les normes suisses ne donnent aucune recommandation concernant ce facteur. La fissuration thermique n'est pas non plus prise en considération étant donné qu'elle ne pose aucun problème pour les chaussées standards suisses selon la méthode mécanistique-empirique.

Dans la présente thèse, les paramètres d'évaluation retenus présentent des évolutions uniformes. En effet, aucun changement abrupt d'un ou de plusieurs paramètres est pris en considération (p. ex. changement majeur des habitudes des utilisateurs ou du climat (tipping point)). En outre des événements exceptionnels, tel que la destruction d'une chaussée suite à un glissement de terrain, ou des événements ayant une influence sur l'état fonctionnel de la chaussée, tel que la diminution de l'adhérence jusqu'à un niveau de sécurité insuffisant, etc. ne sont pas pris en compte.

### 7.1.2. Etape 2 : Evaluation de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées

L'impact du changement climatique sur les performances des chaussées a été évalué à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME (Chapitre 6.4). Toutes les performances (orniérage, fissuration par fatigue, etc.) ont été évaluées pour une multitude de cas distincts (trafic, sol de fondation, type de superstructure, etc.).

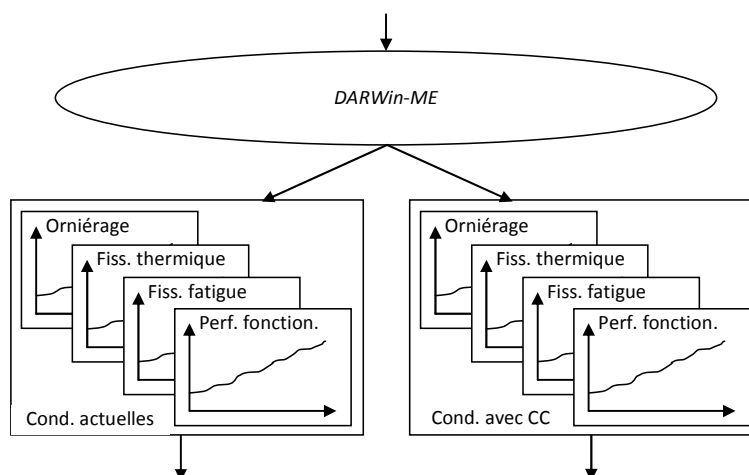


Fig. 7.4 – Schéma de l'analyse de durée de vie et de l'analyse de risque – Etape 2.

D'un point de vue météorologique, l'impact a été évalué pour les trois grandes régions climatiques. En outre, les évaluations ont été effectuées pour les différentes périodes d'analyse et les différents scénarios climatiques.

Pour chaque cas analysés, l'évolution temporelle des conditions météorologiques est intégrée à l'aide des quatre horizons d'analyse. Ainsi une évolution des performances des chaussées testées, ou plus précisément de ses dégradations, peut être évaluée, permettant de prononcer des recommandations pour différents horizons temporels.

### 7.1.3. Etape 3 : Evaluation de la durée de vie des chaussées et analyse de risque

Une distinction est faite entre l'analyse des performances par rapport aux conditions météorologiques actuelles (période de référence 1960 à 1990) et les performances par rapport aux conditions météorologiques futures, modélisées en intégrant le phénomène de changement climatique. Etant donné que le phénomène de changement climatique est un phénomène non homogène dans le temps, quatre horizons d'analyse ont été choisis pour l'analyse des performances, de même que trois scénarios climatiques.

L'évaluation de la durée de vie des chaussées est basée sur une analyse des performances critiques avec intégration des seuils de performances définis selon les normes suisses et les recommandations issues de DARWin-ME. L'outil permet de déterminer l'évolution des performances critiques et d'en tirer des lois de comportement individuels. Ainsi il est possible de déterminer une durée de vie pour chaque cas évalué.

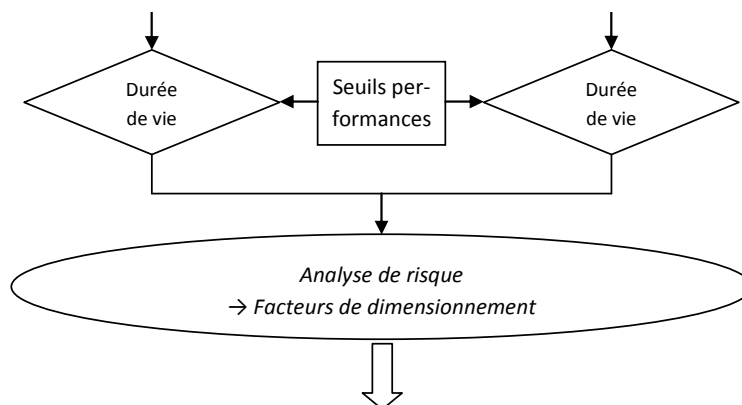


Fig. 7.5 – Schéma de l'analyse de durée de vie et de l'analyse de risque – Etape 3.

Dans une deuxième phase, les résultats issus de l'analyse de durée de vie des chaussées sont intégrés dans une analyse de risque. L'objectif étant d'évaluer la réduction des durées de vies pour les différents cas et d'en tirer des facteurs de risque pour les chaussées. Cette analyse tient compte du caractère probabiliste des facteurs influençant la durée de vie des chaussées. Finalement, une typologie selon les régions climatiques et les périodes d'analyse peut être définie.

### 7.1.4. Etape 4 : Mesures d'adaptation contre le changement climatique

Dans la dernière étape des mesures d'adaptation contre le changement climatique sont proposées afin d'améliorer leurs durées de vie.

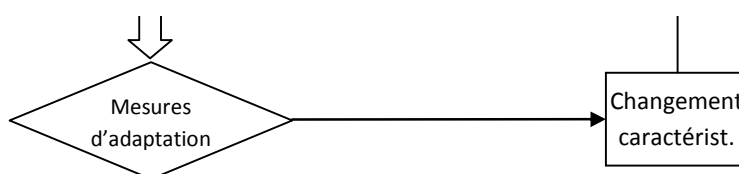


Fig. 7.6 – Schéma de l'analyse de durée de vie et d'analyse de risque – Etape 4.

Les recommandations de changement des paramètres s'intéressent particulièrement au type de superstructures, au dimensionnement des chaussées et aux matériaux composants les différentes couches des structures. Il s'agit ici de proposer des mesures d'adaptation contre le changement climatique pour les infrastructures routières.

Ces mesures permettent par la suite de changer les paramètres d'évaluation de l'étape 1 (Chapitre 7.1.1) et de refaire des évaluations de durée de vie à l'aide d'une analyse de sensibilité des caractéristiques des chaussées. Chaque mesure d'adaptation peut être définie par un facteur de risque correspondant, permettant de réduire le risque à un niveau spécifique.

## 7.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées

L'évaluation de la durée de vie des chaussées est basée sur une analyse des performances critiques avec intégration des seuils de performances définies selon les normes suisses et les recommandations issues de DARWin-ME. Dans le cadre de cette thèse, les durées de vie des chaussées sont uniquement basées sur les performances mécaniques des chaussées. Dans la pratique des travaux de renouvellement des couches de surface sont souvent effectués avant que la durée de vie mécanique ne soit atteinte si celle-ci dépasse les 20 ans.

Dans ce chapitre, la méthodologie employée est brièvement décrites (Chapitre 7.2.1), puis les résultats principaux sont discutés en détail (Chapitre 7.2.2). Finalement, un résumé des principaux résultats est présenté (Chapitre 7.2.3). Les résultats détaillés de l'évaluation de durée de vie des différents cas évalués sont donnés en annexe (Annexe 10.3.3).

### 7.2.1. Méthodologie

Concernant les deux performances critiques retenues (orniérage total et fissuration par fatigue du haut vers le bas), des lois d'évolution distinctes ont été appliquées. L'évolution de l'orniérage suit une loi non linéaire pour un jeune âge de la chaussée et linéaire pour un âge supérieur (phases primaires et secondaires selon les lois de comportement utilisées par DARWin-ME (Chapitre 6.4.2.1)). Pour une chaussée avec une durée de vie se situant dans la phase primaire, l'outil permet de déterminer directement la durée de vie correspondante. Pour une chaussée avec une durée de vie se situant dans la phase secondaire, la durée de vie est déterminée en appliquant une loi d'évolution linéaire aux résultats issus de DARWin-ME. La loi linéaire est prolongée pour les chaussées avec une durée de vie très élevée (Fig. 7.7). La valeur limite de l'orniérage selon la norme SN 640 925b (2003) [135] est de 15 mm.

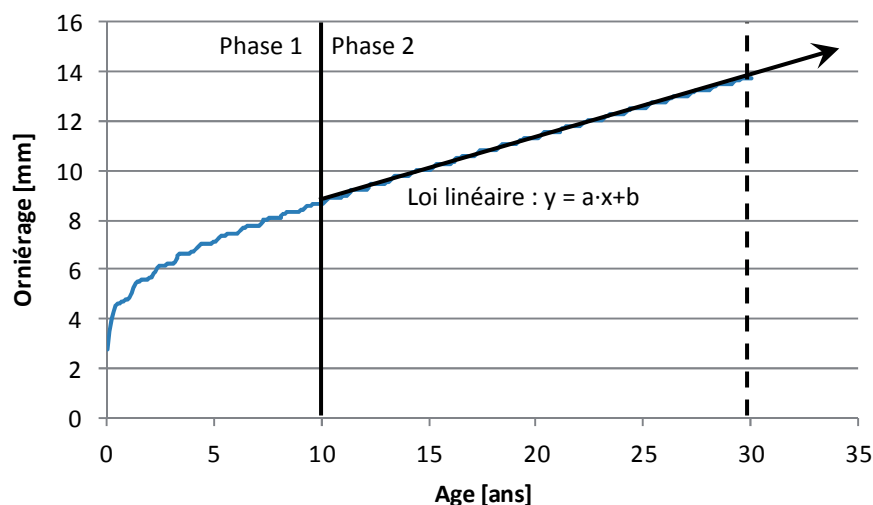


Fig. 7.7 – Evolution de l'orniérage et loi d'évolution.

L'évolution de la fissuration par fatigue du haut vers le bas suit une loi polynômiale pour n'importe quel âge de la chaussée. La fissuration limite permet de déterminer la durée de vie correspondante en appliquant une loi d'évolution polynômiale aux résultats issus de DARWin-ME (Fig. 7.8). La valeur limite de la fissuration par fatigue du haut vers le bas selon la norme SN 640 925b (2003) [135] est de 50 m/km.

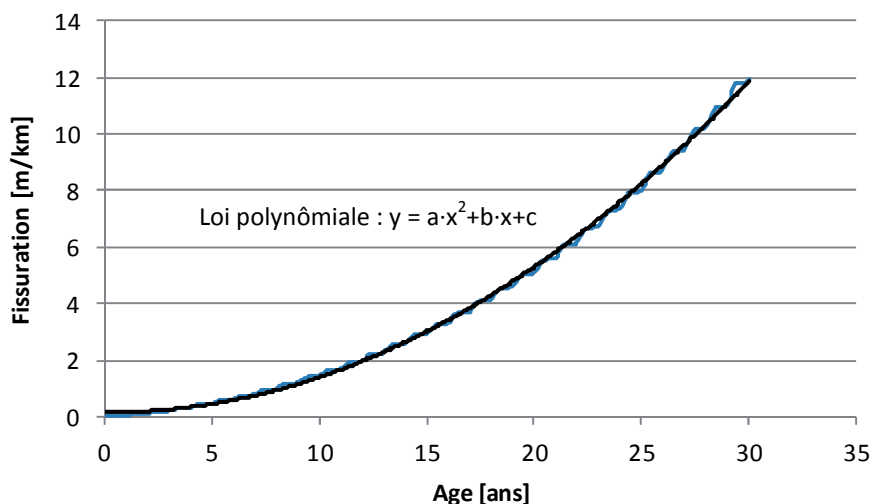


Fig. 7.8 – Evolution de la fissuration et loi d'évolution.

Pour les autres performances (non critiques pour l'état de référence), la fissuration par fatigue du bas vers le haut et la fissuration par fatigue des couches stabilisées suivent également une loi polynômiale.

La durée de vie finale des structures routières évaluées correspond à la durée de vie minimale pour toutes les performances confondues.

### 7.2.2. Résultats détaillés

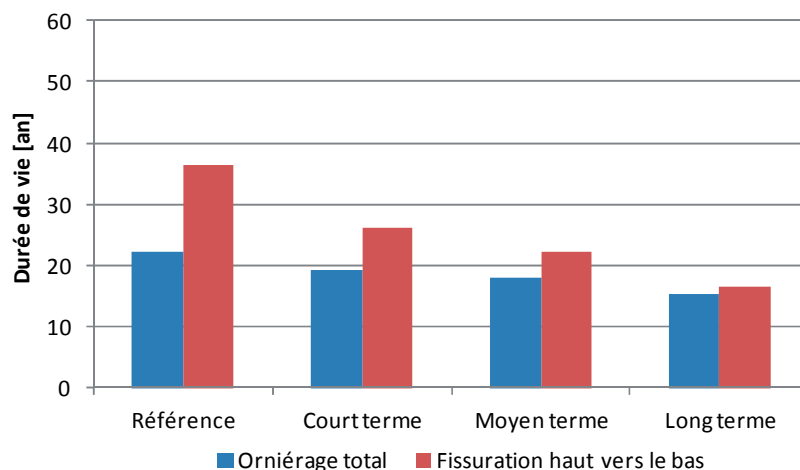
L'analyse de l'impact du changement climatique sur la durée de vie des chaussées classiques mises en place en Suisse a permis de tirer plusieurs constatations. Celles-ci sont décrites à l'aide d'exemples choisis dans les sections suivantes (Chapitres 7.2.2.1 à 7.2.2.7).

De manière générale l'on peut constater que l'orniérage correspond à la performance la plus critique des chaussées suisses standards selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique. L'impact du changement climatique sur les conditions météorologiques et sur la durée de vie des chaussées est important et se traduit dans tous les cas par une diminution de cette durée de vie. Les diminutions relatives peuvent dépasser les 40%.

#### 7.2.2.1. Performance critique

L'évaluation de durée de vie montre que l'orniérage correspond à la performance critique quelque soit le cas évalué. Cette observation peut également être faite pour les cas avec changement climatique. Ainsi les calculs de durée de vie effectués dans les sections suivantes sont basés uniquement sur l'orniérage total des infrastructures routières.

La valeur limite de la fissuration par fatigue du haut vers le bas est dépassée pour plusieurs cas évalués, mais les durées de vie correspondantes sont toujours supérieures aux durées de vie par rapport à l'orniérage. Ainsi l'orniérage total reste le facteur déterminant, même si plusieurs cas existent où les durées de vie par rapport aux deux performances sont très proches (Fig. 7.9).



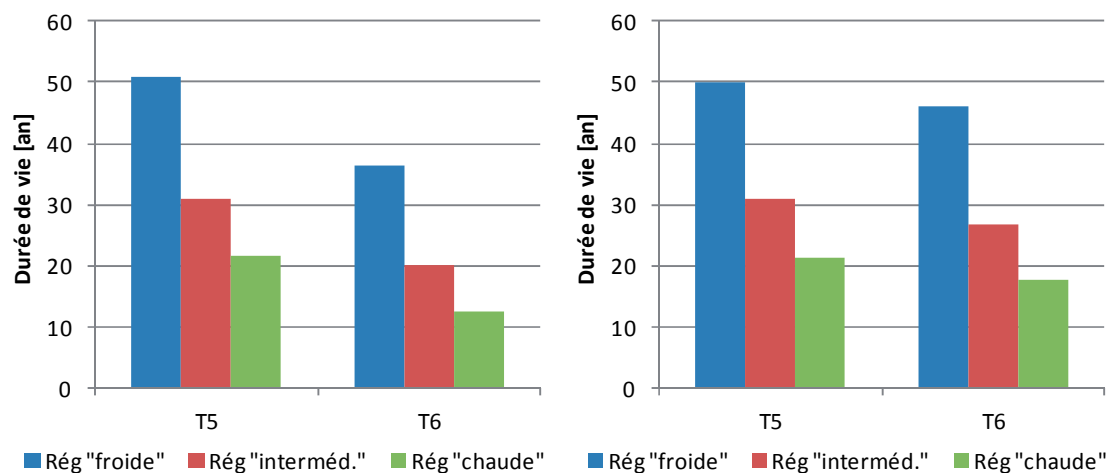
**Fig. 7.9** – Durée de vie par rapport aux performances critiques (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2 ; Région "chaude").

La différence entre la durée de vie par rapport à l'orniérage et celle par rapport à la fissuration par fatigue du haut vers le bas peut être importante. De manière générale cette différence est plus élevée pour les sols de fondation de classe S2 et dans une moindre mesure pour les sols de classe S3, de même que pour les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques). Aucune tendance nette n'est néanmoins observée par rapport à la classe de trafic.

La différence entre les deux caractéristiques est également plus élevée pour la période de référence et le court-terme (quelque soit le scénario climatique), alors qu'à long-terme les durées de vie respectives peuvent être très proches (Fig. 7.9).

#### 7.2.2.2. Trafic

La classe de trafic correspond à un facteur important pour la détermination de la durée de vie des structures routières évaluées. En effet, pour plusieurs cas de superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) une différence de la durée de vie pouvant dépasser les 50% entre un trafic T5 et T6 est observée (Fig. 7.10 – graphique de gauche). Pour les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) les différences restent plus faibles (maximum 21%) (Fig. 7.10 – graphique de droite). Rappelons que le passage d'une classe de trafic à une classe supérieure est associé à une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses des structures routières.



**Fig. 7.10** – Impact du trafic sur la durée de vie (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 2 (droite) ; Période de référence).

### 7.2.2.3. Sol de fondation

Le sol de fondation correspond également à un facteur important pour la durée de vie des structures routières évaluées. En effet, des durées de vies plus faibles pour les classes de portance S2 du sol de fondation et des durées de vie plus élevées pour les sols de classe S4 sont observées. Les sols de classe S3 se situent entre ces deux extrêmes. Les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) présentent les différences les plus élevées entre les différentes classes de portance du sol de fondation (maximum 50% entre le sol S4 et S2 ; Fig. 7.11 – graphique de droite). Les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) et 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) présentent de leur côté des différences plus faibles et proches entre les deux types (maximum 30% entre le sol de classe S4 et S2 ; Fig. 7.11 – graphique de droite). Rappelons que le passage d'une classe de portance à une classe supérieure est associé à diminution de l'épaisseur des couches de fondation (grave, AC F, stabilisation) des structures routières.

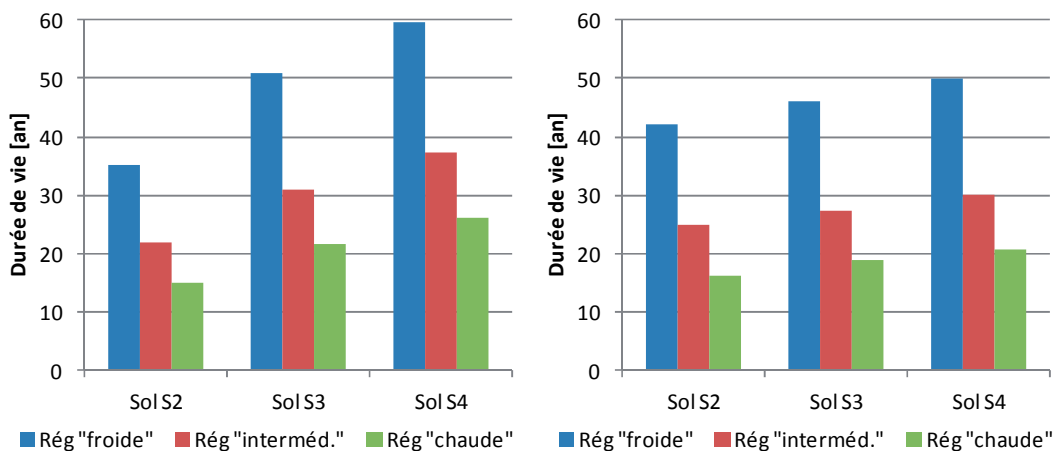


Fig. 7.11 – Impact du sol de fondation sur la durée de vie (Trafic T5 ; Type de superstructure 1 (gauche) et 5 (droite) ; Période de référence).

### 7.2.2.4. Type de superstructure

De manière générale il n'existe pas de tendance nette par rapport au type de superstructure. En effet, en fonction du trafic et du sol de fondation, un type de superstructure peut présenter une durée de vie plus élevée ou plus faible que les autres. Pour un trafic de classe T6, la durée de vie est de manière générale plus faible pour les structures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) (Fig. 7.12). Pour un trafic de classe T5 aucune tendance nette n'est observée.

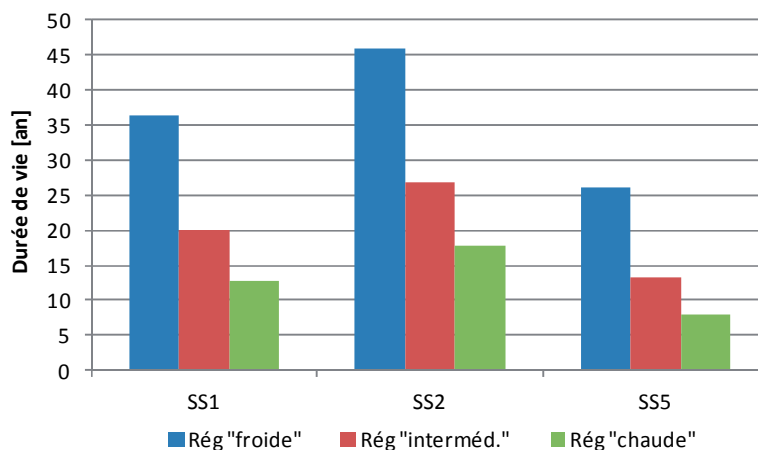


Fig. 7.12 – Impact du type de superstructure sur la durée de vie (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Période de référence).



### 7.2.2.5. Région climatique

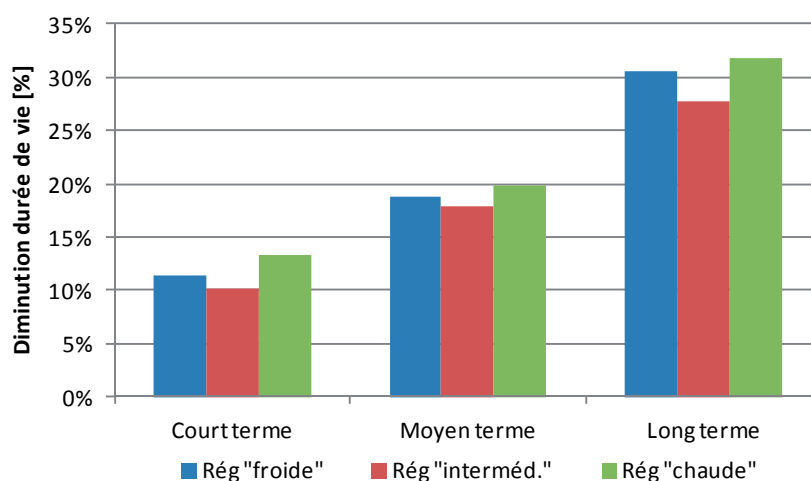
La durée de vie présente une variabilité importante entre les différentes régions climatiques. Ainsi, la région "chaude" présente clairement les valeurs les plus faibles, alors que la région "froide" présente les valeurs les plus élevées. La région "intermédiaire" se situe entre ces deux extrêmes. Cette observation peut être faite pour tous les cas évalués (Fig. 7.10 à Fig. 7.12).

L'augmentation de la durée de vie de la région "froide", respectivement de la région "intermédiaire", par rapport à la région "chaude" peut dépasser les 250%, respectivement les 70%. L'augmentation de la durée de vie de la région "intermédiaire" par rapport à la région "froide" peut dépasser les 100%.

### 7.2.2.6. Horizon d'analyse

En tenant compte du changement climatique, la durée de vie montre une évidente tendance à la diminution avec le temps pour la totalité des cas évalués (Fig. 7.13). La diminution est assez proche pour tous les cas évalués d'une même classe de trafic. Ainsi, pour un trafic T5, la diminution se situe entre 27% et 37% entre la période de référence et la période 2080-2100 (scénario climatique A2), alors que pour un trafic T6, celle-ci peut se situer entre 29% et 39%.

En valeurs absolues, la diminution est toujours plus élevée pour la région "froide" et plus faible pour la région "chaude". Les valeurs minimales de la durée de vie se présentent pour l'horizon à long terme (route construite en 2080).



**Fig. 7.13** – Impact de l'horizon d'analyse sur la durée de vie – diminution en valeurs relatives par rapport à la période de référence (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2).

### 7.2.2.7. Scénario climatique

A court et à moyen-terme, la durée de vie ne présente que très peu de différences entre les scénarios climatiques extrêmes évalués. A long-terme, la durée de vie est plus faible pour le scénario climatique A2 (hétérogène) et plus élevée pour le scénario B1 (intégré et écologique) (Fig. 7.14). Le scénario A1B (intégré), se situe entre ces deux scénarios extrêmes.

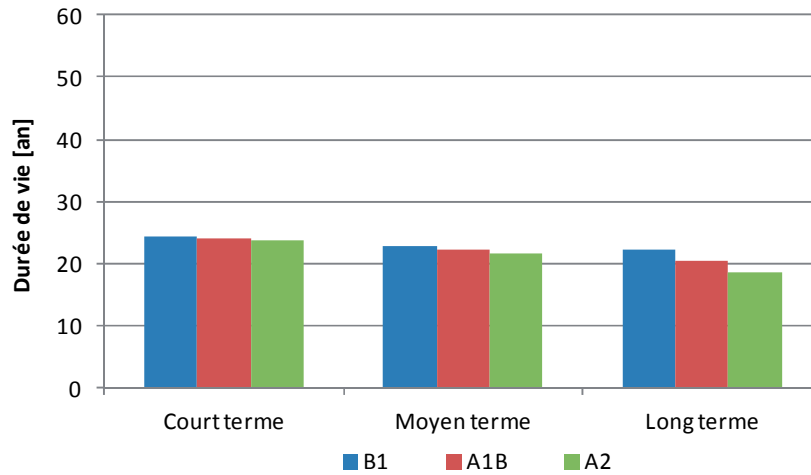


Fig. 7.14 – Impact du scénario climatique sur la durée de vie (Trafic T6 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Région "intermédiaire").

### 7.2.3. Résumé des principaux résultats

Les figures ci-après montrent les durées de vie de tous les cas évalués dans le cadre de cette thèse en nombre de cas (Fig. 7.15 – graphique de gauche) et en pourcentage cumulé (Fig. 7.15 – graphique de droite). L'approximation par courbe de tendance des données indique un pic pour une durée de vie de 17 ans. La durée de vie de 20 ans correspond à 51% du nombre de cas évalués.

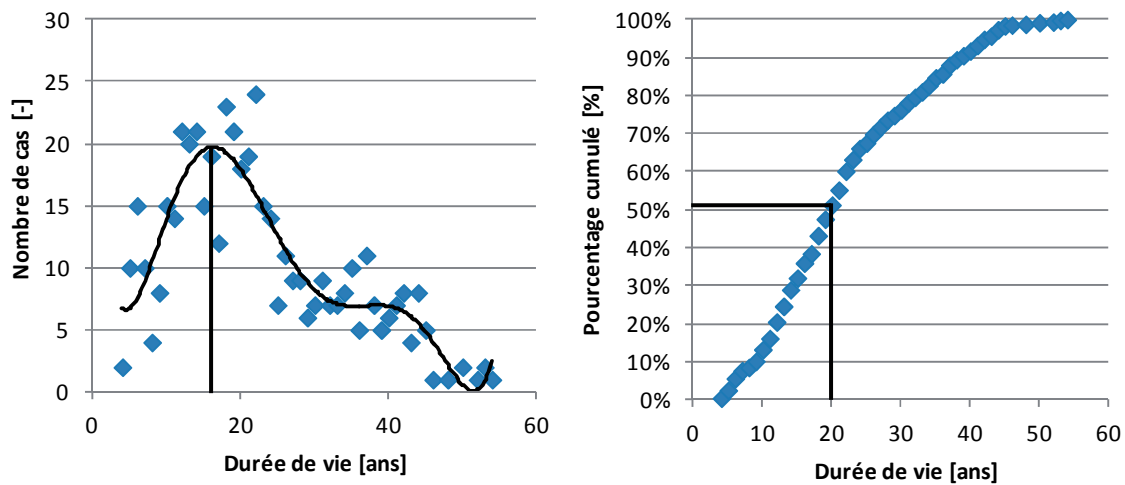


Fig. 7.15 – Durées de vie pour tous les cas évalués.

Dans les tableaux ci-après sont données les différentes durées de vie calculées pour les structures routières suisses standards par rapport aux deux scénarios climatiques B1 (scénario modéré) et A2 (scénario extrême) (Tab. 7.1 et Tab. 7.2).

| Scénario climatique B1 (modéré)                                     |                       |        |        |                       |        |        |                       |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|---|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|
| Région "froide" : Jura, Alpes (altitude élevée)                     |                       |        |        |                       |        |        |                       |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        | Superstructure Type 2 |        |        | Superstructure Type 5 |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |                       |        |        |                       |        |        |                       |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        | Superstructure Type 2 |        |        | Superstructure Type 5 |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |                       |        |        |                       |        |        |                       |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        | Superstructure Type 2 |        |        | Superstructure Type 5 |        |        |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt                    | réf    | ct     | mt                    | lt     | réf    | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |

Légende : réf... référence ; ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|                |          |          |          |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Durée de vie : | ≥ 30 ans | ≥ 20 ans | ≥ 15 ans | ≥ 10 ans | < 10 ans |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|

Tab. 7.1 – Durée de vie des structures routières suisses – Scénario climatique modéré B1.

| Scénario climatique A2 (extrême)                                    |                       |        |        |        |                       |        |        |        |                       |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|---|-----------------------|--------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|--------|-----------------------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|
| Région "froide" : Jura, Alpes (altitude élevée)                     |                       |        |        |        |                       |        |        |        |                       |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        |        | Superstructure Type 2 |        |        |        | Superstructure Type 5 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3                | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3 | Sol S4                |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |
| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |                       |        |        |        |                       |        |        |        |                       |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        |        | Superstructure Type 2 |        |        |        | Superstructure Type 5 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3                | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3 | Sol S4                |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |                       |        |        |        |                       |        |        |        |                       |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| Trafic  | Superstructure Type 1 |        |        |        | Superstructure Type 2 |        |        |        | Superstructure Type 5 |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
|   | Sol S2                | Sol S3 | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3                | Sol S4 | Sol S2 | Sol S3 | Sol S4                |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |
| T3  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T4  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T5  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |
| T6  | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct     | mt     | lt     | réf                   | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt | réf | ct | mt | lt |     |    |    |    |

Légende : réf... référence ; ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|                |          |          |          |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Durée de vie : | ≥ 30 ans | ≥ 20 ans | ≥ 15 ans | ≥ 10 ans | < 10 ans |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|

Tab. 7.2 – Durée de vie des structures routières suisses – Scénario climatique extrême A2.

La méthode de dimensionnement mécanistique-empirique permet de manière indirecte d'évaluer l'impact d'un changement quelconque du climat sur les durées de vie des chaussées. Grâce à l'utilisation de données météorologiques horaires, une évaluation de durée de vie des chaussées sous différents climats est possible.

Dans ce chapitre, les durées de vie des chaussées ont été analysées. Plusieurs conclusions ont pu être tirées de ces évaluations, dont les plus importantes sont :

- Performance critique : Selon la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique l'orniérage correspond à la performance critique des chaussées standards suisses. En effet, quelque soit la chaussée évaluée, sa durée de vie est toujours limitée par le critère de profondeur d'ornière limite.
- Autres performances : Les durées de vie établies selon les critères respectives des autres performances peuvent être très proches des durées de vie par rapport à la performance critique de l'orniérage. Ceci est principalement le cas de la fissuration par fatigue du haut vers le bas.
- Régions climatiques : La région climatique correspond au facteur déterminant pour l'évaluation de durée de vie. En effet, si pour la région "froide" seulement quelques cas isolés, et uniquement à moyen ou long-terme, présentent des durées de vie inférieures à 20 ans, pour la région "chaude" ces cas sont beaucoup plus nombreux et peuvent déjà se présenter pour la période de référence. La région "intermédiaire" se situe entre ces deux extrêmes, avec plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est prévue.

La différence entre les résultats pour les trois régions climatiques montre clairement qu'un dimensionnement adapté aux conditions météorologiques est indispensable. Si pour la région "intermédiaire" seulement quelques adaptations mineures sont nécessaires pour résister au phénomène de changement climatique (par exemple un changement de type de superstructure), la région "chaude" nécessite des adaptations plus conséquentes.

- Scénarios climatiques : Les différences entre les scénarios climatiques sont plutôt faibles et se présentent uniquement à moyen ou à long-terme. Même si en valeurs absolues les durées de vie sont clairement plus faibles pour le scénario extrême A2, les différences par rapport au seuil de 20 ans sont très limitées. En effet, il n'existe que quelques cas où ce seuil est atteint pour le scénario A2 mais pas pour le scénario modéré B1. Cette situation se retrouve pour plusieurs cas de la région climatique "intermédiaire" étant donné que les durées de vie calculées pour cette région se trouvent très proches de 20 ans.
- Période d'analyse : Le nombre de cas présentant des durées de vies inférieures à 20 ans augmente clairement avec le temps. Plusieurs cas existent où cette limite est atteinte déjà à court-terme pour la région climatique "chaude" ou "intermédiaire". Pour la région "froide" la limite ne sera pas atteinte avant 2050 (moyen-terme) ou 2080 (long-terme).
- Classe de trafic : Comme déjà mentionné, les régimes à faible trafic (classes T3 et T4) ne présentent aucun cas où la durée de vie est inférieure à 20 ans. La classe de trafic T5 présente de son côté plusieurs cas où cette limite est dépassée, principalement pour la région "chaude". La classe de trafic T6 présente de nombreux cas où la limite est déjà dépassée pour la période de référence, ce qui indique, selon la méthode mécanistique-empirique, un probable sous-dimensionnement des chaussées suisses standards, principalement dans la région "chaude" et dans une moindre mesure dans la région "intermédiaire".
- Sol de fondation : Les sols de fondation de classe S2 présentent clairement des durées de vie inférieures aux autres classes. Les chaussées prescrites dans la norme pour cette classe semblent, selon la méthode mécanistique-empirique, être sous-dimensionnés pour la région "chaude" et dans une moindre mesure pour la région "intermédiaire".

- Type de superstructure : Les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques), suivies des superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) semblent résister moins bien au phénomène d'orniérage. Ceci se traduit par des durées de vie plus faibles avec de nombreux cas où la limite des 20 ans n'est pas atteinte. Les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) montrent un meilleur comportement. Ainsi pour la région "froide" et la région "intermédiaire", la mise en place d'une superstructure avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F permet d'atteindre des durées de vie de 20 ans. Ceci n'est pas le cas pour la région "chaude".

Le phénomène de changement climatique aura un impact non négligeable sur les durées de vie des chaussées standards à trafic élevé en Suisse. Sans adaptation de la méthode actuelle de dimensionnement des chaussées ou des matériaux utilisés, on risque d'assister à une détérioration du réseau routier suisse et ceci déjà dans un futur assez proche (2020).

Afin de prévenir au maximum la diminution des durées de vie et les coûts de remplacement des chaussées associées, des mesures d'adaptation sont proposées dans le chapitre 7.4.

### **7.3. Analyse de risque**

L'analyse de durée de vie a permis de comparer des durées de vie prévues pour une multitude de cas évalués. Cette notion de durée de vie est néanmoins difficilement utilisable pour analyser de manière globale l'impact du changement climatique sur les chaussées et de proposer des mesures d'adaptation générales. En effet, la multitude de facteurs influençant la durée de vie des chaussées et leurs caractères probabilistes imposent l'utilisation d'une analyse de risque pour mieux juger de l'impact probable.

Dans ce chapitre, tout d'abord la méthodologie employée est brièvement décrite (Chapitre 7.3.1) et un exemple de calcul est présenté (Chapitre 7.3.2). Puis les résultats principaux sont discutés (Chapitre 7.3.3) et finalement la définition de facteurs de risque est présentée (Chapitre 7.3.4). Les résultats détaillés de l'analyse de risque sont donnés en annexe (Annexe 10.4).

#### **7.3.1. Méthodologie**

La méthodologie de l'analyse de risque est divisée en quatre étapes principales (Chapitres 7.3.1.1 à 7.3.1.4) :

- Etape 1 – Définition de la notion de risque : Définition de la notion de risque globale ; Définition de catégories de risques ; Définition des facteurs pris en considération pour l'analyse de risque.
- Etape 2 – Evaluation du risque des chaussées suisses standards : Analyse du risque lié à la réduction des durées de vie des chaussées par rapport au phénomène de changement climatique.
- Etape 3 – Définition d'un facteur de risque des chaussées : Définition d'un facteur de risque des chaussées basé sur les résultats de l'analyse de risque.
- Etape 4 – Recommandations pour les mesures d'adaptation contre le changement climatique : Recommandations pour les mesures d'adaptation contre le changement climatique afin d'améliorer les durées de vie des chaussées.

### 7.3.1.1. Etape 1 : Définition de la notion de risque

Le terme "risque" peut être défini de différentes manières. Dans le cadre de cette thèse, la définition suivante est employée :

*Le risque correspond à la combinaison entre la probabilité d'occurrence d'un événement non souhaité et les conséquences liées à cet événement.*

La probabilité d'occurrence correspond à la probabilité qu'un événement se réalise. Ici, cet événement est caractérisé par la présence de conditions météorologiques ayant un impact défavorable d'un point de vue structurel sur les chaussées. La conséquence correspond à la gravité liée à cet événement, c.-à-d. la diminution de la durée de vie des chaussées due à la présence des conditions météorologiques défavorables. Les notions de probabilité et de conséquences font intervenir une multitude de facteurs divers.

La conséquence (gravité) est divisée en quatre familles :

- Faible : La durée de vie moyenne des chaussées est supérieure à 20 ans.
- Moyenne : La durée de vie moyenne des chaussées se situe entre 15 et 20 ans.
- Grave : La durée de vie moyenne des chaussées se situe entre 10 et 15 ans.
- Très grave : La durée de vie moyenne des chaussées est inférieure à 10 ans.

La probabilité d'occurrence est également divisée en quatre familles :

- Très improbable : La probabilité qu'un cas se présente est nulle ; aucun cas n'est observé où la durée de vie de la chaussées est inférieur à 20 ans.
- Improbable : La probabilité qu'un cas se présente est faible ; moins de 33% des cas présentent une durée de vie de la chaussées inférieur à 20 ans.
- Probable : La probabilité qu'un cas se présente est élevée ; entre 33% et 66% des cas présentent une durée de vie de la chaussées inférieur à 20 ans.
- Très probable : La probabilité qu'un cas se présente est très élevée ; plus de 66% des cas présentent une durée de vie de la chaussées inférieur à 20 ans.

Le risque est déterminé selon la matrice de criticité qui fait intervenir à la fois la notion de probabilité et de conséquences. Elle permet entre autre de définir différentes catégories de risque. La matrice retenue dans le cadre de cette thèse est donnée dans le tableau ci-après (Tab. 7.3).

|             |                 | Conséquence - Gravité |             |             |             |
|-------------|-----------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
|             |                 | Faible                | Moyenne     | Grave       | Très grave  |
| Probabilité | Très improbable | Très faible           | Très faible | Faible      | Moyenne     |
|             | Improbable      | Très faible           | Faible      | Moyenne     | Elevée      |
|             | Probable        | Faible                | Moyenne     | Elevée      | Très élevée |
|             | Très probable   | Moyenne               | Elevée      | Très élevée | Très élevée |

**Tab. 7.3** – Matrice de criticité et catégorie de risque associée.

Les catégories de risque s'étendent d'un risque très faible à un risque très élevé. La catégorie de risque très faible correspond à un risque acceptable, nécessitant aucune intervention pour adapter le risque. Par contre la catégorie de risque très élevée correspond à un risque non acceptable, rendant indispensable une intervention pour réduire le risque jusqu'à un niveau acceptable.

Les principaux facteurs pris en considération pour l'analyse de risque sont les caractéristiques climatiques et les caractéristiques structurelles. L'analyse de risque a été effectuée pour les trois régions climatiques générales (chaude, intermédiaire et froide), pour les trois périodes d'analyse (court, moyen et long-terme), les trois scénarios climatiques (B1, A1B, A2) de même que pour les trois classes de portance du sol de fondation (S2 à S4), les quatre classes de trafic (T3 à T6) et les trois types de superstructure (SS1, SS2 et SS5).

#### *7.3.1.2. Etape 2 : Evaluation du risque des chaussées suisses standards*

Pour chaque région climatique, chaque interaction classe de portance du sol de fondation – classe de trafic, chaque période d'analyse, chaque scénario climatique et chaque type de superstructure la situation de risque a été évaluée en faisant varier différents facteurs. Dans une première approche, le scénario climatique et le type de superstructure ont été choisis comme facteurs permettant de déterminer la probabilité et la conséquence de la situation de risque. Dans une deuxième approche, la classe de portance du sol de fondation et la classe de trafic (uniquement pour un trafic T5 et T6) ont été ajoutés aux facteurs d'analyse.

Cette évaluation du risque a été appliquée aux chaussées suisses standards décrites ultérieurement (Chapitre 6.4.3). Ceci a permis de définir pour chacune des situations de risque la probabilité d'occurrence et la conséquence correspondante et de finalement déterminer sa catégorie de risque.

#### *7.3.1.3. Etape 3 : Définition d'un facteur de risque des chaussées*

Pour chaque catégorie de risque un facteur de risque des chaussées lié au changement climatique est défini. Ce facteur  $f_{CC}$  permet par la suite de définir l'étendue des mesures d'adaptation à appliquer afin de diminuer le risque à un niveau acceptable.

#### *7.3.1.4. Etape 4 : Recommandations pour les mesures d'adaptation contre le changement climatique*

Finalement, des recommandations par rapport aux mesures d'adaptation contre le changement climatique sont proposées. L'objectif étant d'améliorer les durées de vie des chaussées et de diminuer le risque global.

### **7.3.2. Exemple de calcul**

Pour l'exemple de calcul, la situation de risque suivante a été évaluée selon la première approche :

- Région climatique "intermédiaire",
- Période d'analyse à moyen-terme,
- Classe de trafic T6,
- Classe de portance S3 du sol de fondation.

Les facteurs permettant de déterminer la probabilité et la conséquence de la situation de risque sont le scénario climatique et le type de superstructure. Les durées de vie pour les différents cas de cette situation de risque, calculées selon l'analyse de durée de vie (Chapitre 7.2), sont données dans le tableau ci-après (Tab. 7.4).



| Durée de vie [an]   |     | Superstructure |      |      |
|---------------------|-----|----------------|------|------|
|                     |     | SS1            | SS2  | SS5  |
| Scénario climatique | B1  | 16.9           | 22.7 | 10.8 |
|                     | A1B | 16.0           | 21.7 | 10.2 |
|                     | A2  | 16.2           | 21.6 | 10.6 |

Tab. 7.4 – Exemple de calcul – Durées de vie pour la situation de risque évaluée.

La probabilité d'occurrence pour cette situation de risque est "très probable". En effet, plus que la majorité des cas (6 cas sur 9 = 66.7%) présentent une durée de vie de la chaussée inférieure à 20 ans.

La conséquence (gravité) pour cette situation de risque est "moyenne". En effet, la durée de vie moyenne des chaussées se situe entre 15 et 20 ans (16.3 ans).

Ainsi cette situation de risque fait partie de la catégorie de risque "élevée" selon la matrice de criticité employée (Tab. 7.5).

|             |                 | Conséquence - Gravité |               |             |             |
|-------------|-----------------|-----------------------|---------------|-------------|-------------|
|             |                 | Faible                | Moyenne       | Grave       | Très grave  |
| Probabilité | Très improbable | Très faible           | Très faible   | Faible      | Moyenne     |
|             | Improbable      | Très faible           | Faible        | Moyenne     | Elevée      |
|             | Probable        | Faible                | Moyenne       | Elevée      | Très élevée |
|             | Très probable   | Moyenne               | <b>Elevée</b> | Très élevée | Très élevée |

Tab. 7.5 – Exemple de calcul - Catégorie de risque pour la situation évaluée.

Dans la deuxième approche, la classe de portance du sol de fondation et la classe de trafic (uniquement pour un trafic T5 et T6) ont été ajoutés aux facteurs déjà choisis pour la première approche (scénario climatique, type de superstructure). Ceci multiplie le nombre de cas à évaluer pour déterminer la catégorie de risque associée (54 cas au total).

Les résultats détaillés de l'analyse sont donnés en annexe (Annexe 10.4).

### 7.3.3. Résultats principaux

Les résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses standards sont résumés dans les tableaux ci-après (Tab. 7.6 et Tab. 7.7). Dans le premier tableau, le scénario climatique et le type de superstructure correspondent aux facteurs permettant de déterminer la probabilité et la conséquence de la situation de risque (première approche). Dans le deuxième tableau, la classe de portance du sol de fondation et la classe de trafic ont été ajoutées aux facteurs permettant de déterminer la probabilité et la conséquence de la situation de risque (deuxième approche).

| Région "froide" : Jura, Alpes (altitude élevée)                     |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Trafic  | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| T3  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T4  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T5  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T6  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Trafic  | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| T3  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T4  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T5  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T6  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Trafic  | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| T3  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T4  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T5  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T6  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

Risque : Très faible Faible Moyen Elevé Très élevé

**Tab. 7.6** – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses (première approche).

Pour la première approche, on remarque que les risques moyens, élevés et très élevés ne s'observent uniquement pour les régions "intermédiaire" et "chaude" et uniquement pour un trafic élevé à très élevé (T5 et T6). La région "froide" ne présente que des risques faibles ou très faibles par rapport au changement climatique.

La région "intermédiaire" présente des risques élevés et très élevés pour un trafic très fort (T6) et pour un trafic élevé (T5) avec un sol de fondation de classe S2. Le cas T5-S2 présente en outre un risque très faible à court-terme, un risque moyen à moyen-terme et un risque élevé à long-terme. Ce cas démontre la nécessité de la mise en place de mesures d'adaptation des structures routières pour lutter contre le phénomène de changement climatique. Pour un trafic très élevé (T6), des mesures d'adaptation plus conséquentes seront nécessaires, étant donné les niveaux de risque élevés ou très élevés.

La région "chaude" présente un risque très élevé déjà à court-terme pour tous les cas avec un trafic très élevé (T6) et pour le cas T5-S2. Cette région nécessite clairement la mise en place de mesures d'adaptation conséquentes, et ceci déjà à court-terme.

| Région "froide" : Jura, Alpes<br>(altitude élevée) |                 |                | Région "intermédiaire" : Plateau,<br>Préalpes, Alpes (altitude faible) |                 |                | Région "chaude" : Bassin<br>Lémanique, Sud des Alpes |                 |                |
|--|-----------------|----------------|--|-----------------|----------------|--|-----------------|----------------|
| court-<br>terme                                    | moyen-<br>terme | long-<br>terme | court-<br>terme  | moyen-<br>terme | long-<br>terme | court-<br>terme                                      | moyen-<br>terme | long-<br>terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

**Tab. 7.7** – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses (deuxième approche).

Pour la deuxième approche, l'analyse de risque montre que la région "froide" ne présente que des risques très faible quelque soit la période d'analyse.

La région "intermédiaire" présente un risque faible à court-terme, un risque moyen à moyen-terme et un risque élevé à long-terme. Cette région présente donc un impact important du changement climatique sur les chaussées routières. En effet, une adaptation continue des chaussées sera nécessaire afin de garder les risques à un niveau acceptable.

La région "chaude" présente un risque très élevé quelque soit la période d'analyse. Cette région nécessite clairement la mise en place de mesures d'adaptation conséquentes, et ceci déjà à court-terme (2020). La région est caractérisée par une non-conformité des chaussées par rapport aux conditions météorologiques.

La deuxième approche, plus générale, permet d'avoir un aperçu du risque lié au changement climatique par rapport aux régions climatiques et à la période d'analyse. Cette approche simplifie grandement la prise en compte des différentes caractéristiques liées à la structure, au trafic et aux prévisions climatiques. Il s'agit ici d'une analyse permettant d'avoir un aperçu général de la problématique. La première approche reste plus concrète.

Les résultats issus de l'analyse de risque permettent de repérer les cas critiques nécessitant des mesures d'adaptation. Les mesures sont donc évaluées par la suite uniquement pour ces cas critiques (régions "intermédiaire" et "chaude", trafic T5 et T6, sols de fondation de classes S2 à S4, périodes d'analyse court-terme à long-terme). L'analyse détaillée est exposée dans le Chapitre 7.4.

#### 7.3.4. Définition d'un facteur de risque

Pour chaque catégorie de risque un facteur de risque des chaussées lié au changement climatique est défini. Ce facteur  $f_{cc}$  a pour objectif de définir l'étendue des mesures d'adaptation à appliquer afin de diminuer le risque à un niveau acceptable. Les facteurs de risques définis dans le cadre de cette thèse sont donnés dans le tableau ci-après (Tab. 7.8).

| Catégorie de risque        | Très faible | Faible | Moyenne | Elevée | Très élevée |
|----------------------------|-------------|--------|---------|--------|-------------|
| Facteur de risque $f_{cc}$ | 0.0         | 0.5    | 1.0     | 1.5    | 2.0         |

**Tab. 7.8** – Facteurs de risque associés aux catégories de risque.

Le facteur de risque permet de valoriser le risque afin de définir l'étendue des mesures d'adaptation à appliquer pour diminuer le facteur à un niveau acceptable. Ceci permet par la suite de juger de la pertinence d'une mesure d'adaptation. Ainsi chaque mesure d'adaptation a sa variation du facteur de risque associée ( $\Delta f_{cc}$ ) qui se traduit par une diminution ou une augmentation du risque par rapport aux cas sans mesure d'adaptation (cas de référence). La définition et la méthode de calcul du facteur  $\Delta f_{cc}$  associé à une mesure d'adaptation est définie dans le Chapitre 7.4.1.

L'objectif du facteur de risque est de juger de la pertinence d'une mesure d'adaptation pour ramener le risque à un niveau acceptable. Pour ce faire, il est nécessaire de définir le niveau de risque acceptable. Dans le cadre de cette thèse, un risque acceptable est défini par une catégorie de risque faible ( $f_{cc} = 0.5$ ). En effet, l'objectif des mesures d'adaptation étant de ramener le risque que les chaussées routières suisses ne résistent pas au changement climatique à un risque acceptable. Le choix de la catégorie de risque faible permet d'assurer que pour une probabilité d'occurrence probable une durée de vie supérieure à 20 ans est atteinte. Le choix de la catégorie de risque très faible en tant que risque acceptable serait trop onéreux et le choix de la catégorie de risque moyenne impliquerait que pour une probabilité d'occurrence probable une durée de vie entre 15 et 20 ans serait visée.

## **7.4. Mesures d'adaptation contre le changement climatique**

Les mesures d'adaptation ont pour objectif d'apporter des adaptations aux chaussées standards utilisées en Suisse, afin d'améliorer leurs capacités à résister au phénomène de changement climatique et ainsi d'augmenter leurs durées de vie et de diminuer leur risque. Ces mesures peuvent être de diverses natures. Dans le cadre de cette thèse, deux familles de mesures ont été évaluées : Le changement des paramètres structurels des chaussées et le changement des paramètres des matériaux composant ces chaussées.

Ces mesures permettent par la suite de changer les paramètres d'évaluation de l'étape 1 de la méthodologie générale de l'analyse de durée vie et de l'analyse de risque des chaussées (Chapitre 7.1), et de refaire une évaluation complète de la durée de vie et du risque. L'objectif des mesures d'adaptation étant de diminuer le risque à un niveau acceptable ( $f_{cc} = 0.5$ ) pour toutes les situations de risque.

Dans ce chapitre, tout d'abord la définition et la méthode de calcul du facteur de risque  $\Delta f_{cc}$  est décrite (Chapitre 7.4.1), puis les différentes mesures d'adaptation sont décrites, leurs impacts sur la durée de vie des chaussées évalués à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME et leur impact sur le risque lié au changement climatique analysé (Chapitres 7.4.2 et 7.4.3). Finalement des recommandations sont faites par rapport aux différents cas analysés (Chapitre 7.4.4).

Les mesures d'adaptation ont été évaluées pour les cas présentant des risques moyens à très élevés. Ainsi uniquement les régions climatiques "intermédiaire" et "chaude" et uniquement les classes de trafic élevé et très élevé (T5 et T6) ont été retenues. Pour la région "intermédiaire", uniquement les cas avec une classe de portance S2 du sol de fondation ont été analysés (Tab. 7.9). Les hypothèses et paramètres d'analyses prises en considération ont été décrits dans le Chapitre 7.1.

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Trafic  | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| T5  | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
| T6  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Trafic  | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| T5  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T6  | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

Risque : 

|             |        |       |       |            |
|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|-------------|--------|-------|-------|------------|

**Tab. 7.9** – Résultats principaux de l'analyse de risque des cas évalués par rapport aux mesures d'adaptation.

Les impacts sont décrits dans les sections suivantes à l'aide d'exemples choisis. Les résultats détaillés de toutes les mesures d'adaptation évaluées peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5).

#### 7.4.1. Définition du facteur de risque $\Delta f_{CC}$

La méthode de détermination du facteur  $\Delta f_{CC}$  est basée sur l'évaluation et la comparaison entre les analyses de risque des cas avec mesure d'adaptation par rapport aux cas sans mesure d'adaptation. Pour les cas sans mesure d'adaptation uniquement les situations de risque évaluées selon le tableau ci-dessus (Tab. 7.9) sont considérées. Il s'agit des 30 situations les plus critiques ayant une durée de vie moyenne de 14.4 ans et dont 83.3% des cas présentent une durée de vie inférieure à 20 ans.

Sur les 30 situations de risque évaluées, 17 situations présentent un risque très élevé (facteur 2.0), 10 situations présentent un risque élevé (facteur 1.5), 2 situations présentent un risque moyen (facteur 1.0), aucune situation ne présente un risque faible (facteur 0.5) et 1 situation présente un risque très faible (facteur 0.0). Pour déterminer un facteur de risque global  $f_{CC,global}$ , la moyenne des facteurs des différentes situations de risque est calculée :

$$f_{CC,global} = \frac{\sum_{i=très\ élevé}^{très\ élevé} nb_i \cdot f_{CC,i}}{\sum_{i=très\ faible}^{très\ élevé} nb_i} \quad (\text{Équation 21})$$

Avec : i      Catégorie de risque      [-]  
 $f_{CC,i}$     Facteur de risque selon Tab. 7.8 pour une catégorie i      [-]  
 $nb_i$     Nombre de situations de risque pour une catégorie i      [-]

Pour l'état de référence, c.-à-d. sans mesure d'adaptation, le facteur de risque global est le suivant :

$$f_{CC,global,sans} = \frac{(17 \cdot 2.0) + (10 \cdot 1.5) + (2 \cdot 1.0) + (0 \cdot 0.5) + (1 \cdot 0.0)}{(17 + 10 + 2 + 0 + 1)} = 1.70 \quad (\text{Équation 22})$$

Ce facteur correspond à une catégorie de risque se situant entre un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) et un niveau très élevé ( $f_{CC} = 2.0$ ).

Pour chaque mesure d'adaptation le facteur de risque global  $f_{CC,global,mesure\ x}$  est déterminé puis comparé au facteur global sans mesure d'adaptation ci-dessus. La formule suivant est employée pour déterminer le facteur de risque  $\Delta f_{CC}$  par rapport à une mesure d'adaptation donnée :

$$\Delta f_{CC} = f_{CC,global,sans} - f_{CC,global,mesure\ x} \quad (\text{Équation 23})$$

Avec :  $f_{CC,global,mesure\ x}$  Facteur de risque global pour une mesure x [-]

#### 7.4.2. Changement des paramètres structurels

Le changement des paramètres structurels des chaussées peut se traduire de manières différentes. Ainsi dans le cadre de cette thèse, différentes mesures d'adaptation ont été évaluées. Ces mesures sont décrites dans les chapitres à suivre (Chapitres 7.4.2.1 à 7.4.2.6).

##### 7.4.2.1. Mesure 1 : Changement du type de superstructure

Les résultats de calcul détaillés de l'analyse de risque peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.1).

##### **Description et hypothèses de la mesure**

La mesure consiste à utiliser le type de superstructure permettant d'atteindre les durées de vies les plus élevées par rapport à chaque cas évalué individuellement. Ainsi, il convient de choisir un type de superstructure 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) pour les cas avec une classe de trafic T6 et quelques soient les autres paramètres (région climatique, scénario climatique, période d'analyse, classe de portance du sol de fondation). Pour un trafic de classe T5, il convient de choisir également un type de superstructure 2 pour les sols de fondation de classe S2 et un type de superstructure 1 (enrobé bitumineux sur grave) pour les sols de fondation de classes S3 et S4, quelque soit les autres paramètres.

##### **Impact sur les performances des infrastructures routières**

Cette mesure a déjà été évaluée de manière indirecte lors de l'analyse de l'impact du changement climatique sur les performances des chaussées à l'aide de la méthode mécanistique-empirique dans le Chapitre 6.4.4. Il convient de noter qu'aucun type de superstructure ne permet de résoudre tous les problèmes, c.-à-d. que pour certains cas aucun des trois types de superstructure retenus dans le cadre de cette thèse ne permet d'atteindre une durée de vie supérieure à 20 ans.

##### **Analyse de risque et facteur de risque associé**

La mesure d'adaptation "Changement du type de superstructure" permet de diminuer le risque de plusieurs des situations de risque évaluées. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.10).

Pour la région "intermédiaire" le risque est très faible pour toutes les situations de risque évaluées à court et à moyen terme, et à long-terme celui-ci atteint au maximum un niveau moyen (trafic T6 ; trafic T5 avec sol de fondation de classe S2). Grâce à la mise en place de cette mesure d'adaptation le risque lié au changement climatique peut être diminuée de manière importante dans la région "intermédiaire".

Pour la région "chaude" le risque reste élevé ou très élevé pour toutes les situations de risque évaluées, à l'exception des situations avec un trafic T5, un sol de fondation de classe S4 et une période d'analyse à court et moyen-terme. Pour ces dernières situations le risque peut-être diminué de manière très importante avec le passage d'un risque élevé sans mesure d'adaptation à un risque très faible avec mesure d'adaptation. La mise en place de cette mesure ne permet pas de lutter intégralement contre le risque lié au changement climatique dans la région "chaude". Pour cette région des mesures plus conséquentes ou la combinaison de plusieurs mesures sont nécessaires.

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.10 – Mesure 1 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 17.9 ans (sans mesure : 14.4 ans), avec 61.1% des cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans (sans mesure : 83.3%).

Les facteurs de risque associés à la mesure d'adaptation "Changement du type de superstructure" sont les suivants :

$$f_{CC,global,mesure\ 1} = 1.10 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 1} = -0.60$$

Ce facteur correspond à une catégorie de risque se situant entre un niveau moyen ( $f_{CC} = 1.0$ ) et un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ). La diminution du risque grâce à la mesure d'adaptation est importante ( $\Delta f_{CC,mesure\ 1} = 0.60$  ; diminution de 35.3%).

### Commentaires et conclusions

La mesure d'adaptation "Changement du type de superstructure" permet de diminuer de 35.3% le risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation, mais le risque reste moyen à élevé ( $f_{CC,global,mesure\ 1} = 1.10$ ). Pour certaines situations de risque cette mesure d'adaptation correspond à une variante très intéressante, principalement pour la région climatique "intermédiaire". Pour la région climatique "chaude" cette mesure n'est pas assez conséquente.

La mesure d'adaptation peut être mise en place assez facilement pour la construction d'une nouvelle infrastructure routière. L'utilisation du type de superstructure 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) est recommandée.

#### 7.4.2.2. Mesure 2 : Adaptation de la portance du sol de fondation

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.2).

##### **Description et hypothèses de la mesure**

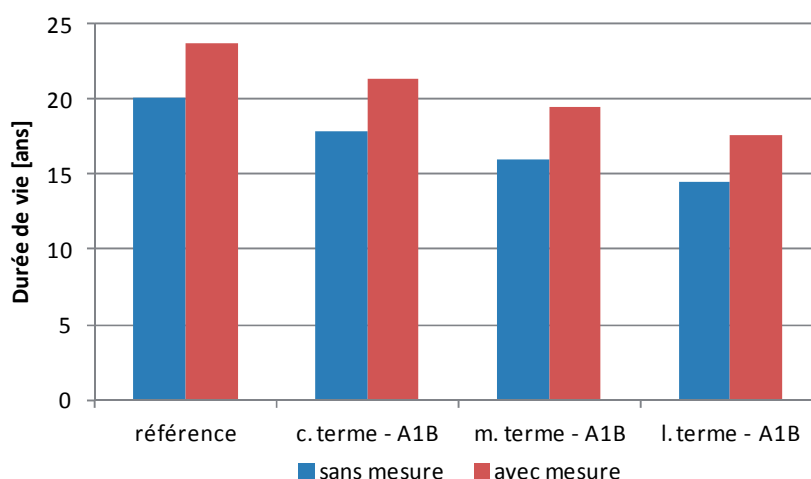
La mesure consiste à augmenter la portance des sols de fondation présentant une classe de portance moyenne S2 et élevé S3. Ainsi, pour les sols de fondation de classe S2 les caractéristiques d'un sol de classe S3 sont mises en place (CBR moyen de 18% et module de 112 MPa), et pour les sols de fondation de classe S3 les caractéristiques d'un sol de classe S4 sont mises en place (CBR moyen de 27% et module de 145 MPa). Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches de grave, caractéristiques de superstructures, etc.).

Cette mesure s'intéresse uniquement aux situations de risque pour les sols de fondation de classes S2 et S3. La mesure n'est pas appliquée aux sols de classe S4 car ces sols présentent déjà une portance très élevée et l'augmentation de la portance de ces sols serait très difficile. Pour le calcul du facteur de risque global, les durées de vie issues de l'analyse générale ont été prises en considération pour les situations de risque avec un sol de classe S4 (Chapitre 7.3).

##### **Impact sur les performances des infrastructures routières**

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation de la portance du sol de fondation" a fait l'objet d'une évaluation complète. L'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué, mais la fissuration par fatigue du haut vers le bas présente encore plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est observée. La fissuration par fatigue du bas vers le haut et la fissuration par fatigue des couches stabilisées ne deviennent pas une performance critique avec cette mesure d'adaptation.

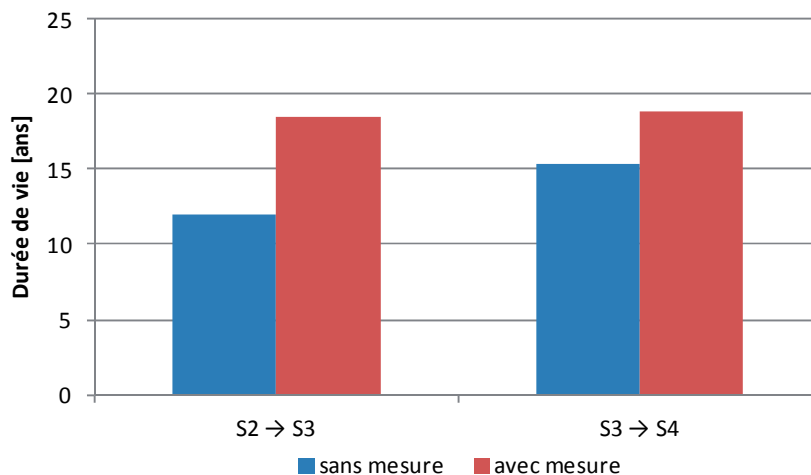
Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation sont importantes. Une augmentation marquée de la durée de vie des chaussées avec la mise en place de la mesure peut être observée pour tous les cas. L'augmentation maximale de la durée de vie peut dépasser les 60% pour les sols de fondation S2 passant en classe S3, et les 25% pour les sols de fondation S3 passant en classe S4 (Fig. 7.16).



**Fig. 7.16** – Impact de l'adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "intermédiaire").



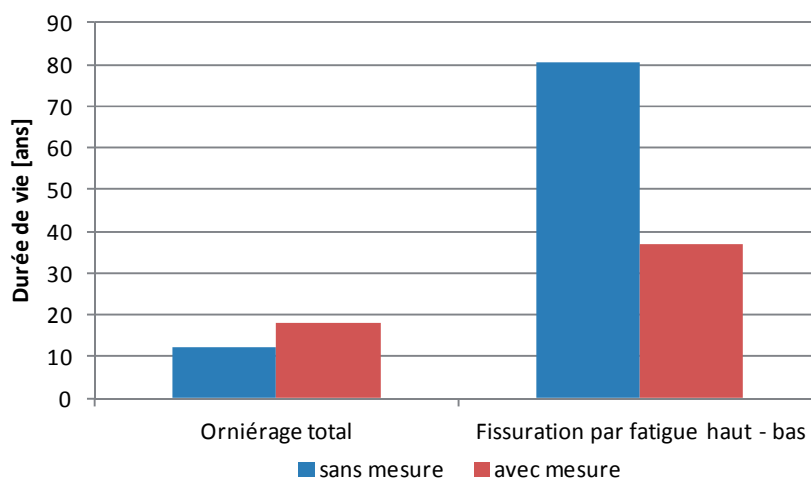
Les changements des durées de vie observés sont assez proches entre les deux régions climatiques pour les cas équivalents. La même constatation peut être faite pour les deux classes de trafic et les trois scénarios climatiques. Par rapport aux deux classes de sol de fondation, une augmentation plus marquée des durées de vie est observée pour les sols de classe S2 passant en classe S3. La différence entre ces deux cas peut être importante (Fig. 7.17).



**Fig. 7.17** – Impact de l'adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A2 ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme).

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution marquée pour tous les cas évalués.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Augmentation pour tous les cas évalués. Diminution marquée des durées de vie par rapport à la fissuration pour les superstructures de type 1 et 2 et pour un sol de fondation S2 passant en classe S3 (entre 50 et 80%), diminution moyenne pour les superstructures de type 1 et 2 et pour un sol de fondation S3 passant en classe S4 (entre 20 et 60%) et diminution faible pour les superstructures de type 5 (entre 15 et 30%) (Fig. 7.18). Même avec des diminutions marquées des durées de vie, la fissuration par fatigue du haut vers le bas reste moins critique que l'orniérage total.



**Fig. 7.18** – Impact de l'adaptation de la portance du sol de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à moyen terme).

- Fissuration par fatigue du bas vers le haut (faïençage) : Diminution pour les superstructures de type 1 et 2 et légère augmentation pour les superstructures de type 5. Mais en valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Légère augmentation pour les superstructures de type 5 (inférieure à 3%). Mais en valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

### Analyse de risque et facteur de risque associé

La mesure d'adaptation "Adaptation de la portance du sol de fondation" permet de diminuer le risque de plusieurs situations de risque. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.11).

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |              |              |             |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|-------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4       |              |             |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué   |              |             |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme  | moyen-terme  | long-terme  |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué   |              |             |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme* | moyen-terme* | long-terme* |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |              |              |             |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4       |              |             |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme  | moyen-terme  | long-terme  |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme  | moyen-terme  | long-terme  |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme* | moyen-terme* | long-terme* |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme* | moyen-terme* | long-terme* |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

\* Risque selon résultats de l'analyse générale

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.11 – Mesure 2 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

Pour la région "intermédiaire" la diminution du risque est marquée pour les cas avec un trafic de classe T5. Pour les autres situations de risque évaluées la diminution du risque est moyenne à faible. Grâce à la mise en place de cette mesure le risque lié au changement climatique peut être diminué de manière moyenne dans cette région.

Pour la région "chaude" le risque reste élevé ou très élevé pour la plupart des situations de risque évaluées, à l'exception des situations avec un trafic T5, un sol de fondation de classe S3 et une période d'analyse à court et moyen-terme. Pour ces dernières situations le risque peut-être diminué de manière non négligeable avec le passage d'un risque élevé sans mesure d'adaptation à un risque faible ou moyen avec mesure d'adaptation. La mise en place de la mesure ne permet pas de lutter intégralement contre le risque lié au changement climatique dans cette région, surtout pour les cas avec un trafic de classe T6. Pour la région "chaude" des mesures plus conséquentes ou la combinaison de plusieurs mesures sont nécessaires.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 17.4 ans (sans mesure : 14.4 ans) avec 67.4% des cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans (sans mesure : 83.3%).

Les facteurs de risque associés à la mesure d'adaptation "Adaptation de la portance du sol de fondation" sont les suivants :

$$f_{CC,global,mesure\ 2} = 1.38 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 2} = -0.32$$

Ce facteur correspond à une catégorie de risque se situant entre un niveau moyen ( $f_{CC} = 1.0$ ) et un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ). La diminution du risque grâce à la mesure d'adaptation est moyenne ( $\Delta f_{CC,mesure\ 2} = -0.32$  ; diminution de 18.8%).

### **Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation de la portance du sol de fondation" permet de diminuer de 18.8% le risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation, mais le risque reste moyen à élevé ( $f_{CC,global,mesure\ 2} = 1.38$ ). Pour certaines situations de risque cette mesure d'adaptation correspond à une variante intéressante, principalement pour la région climatique "intermédiaire". Pour la région climatique "chaude" cette mesure n'est pas assez conséquente.

La mise en place de la mesure d'adaptation est très difficile. En effet, l'amélioration de la portance du sol de fondation avec la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière correspond à un procédé compliqué et onéreux. La mise en place de cette mesure n'est donc recommandée que pour des cas très spécifiques. En plus, cette mesure ne s'intéresse pas aux sols de fondation de classe S4.

#### **7.4.2.3. Mesure 3 : Adaptation des épaisseurs des couches de grave**

Les résultats de calcul détaillés de l'évaluation de la durée de vie à l'aide de DARWin-ME peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.3).

### **Description et hypothèses de la mesure**

La mesure consiste à adapter les épaisseurs des couches de grave. Cette mesure ne concerne que les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F sur grave) présentant des couches de grave. Les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) ne présentent pas de couches de grave. L'adaptation des épaisseurs des couches stabilisées est analysée dans la mesure 4 (Chapitre 7.4.2.4).

La mesure a été divisée en deux variantes :

- a) Augmentation des épaisseurs des couches de grave de 50 mm.
- b) Augmentation des épaisseurs des couches de grave de 100 mm.

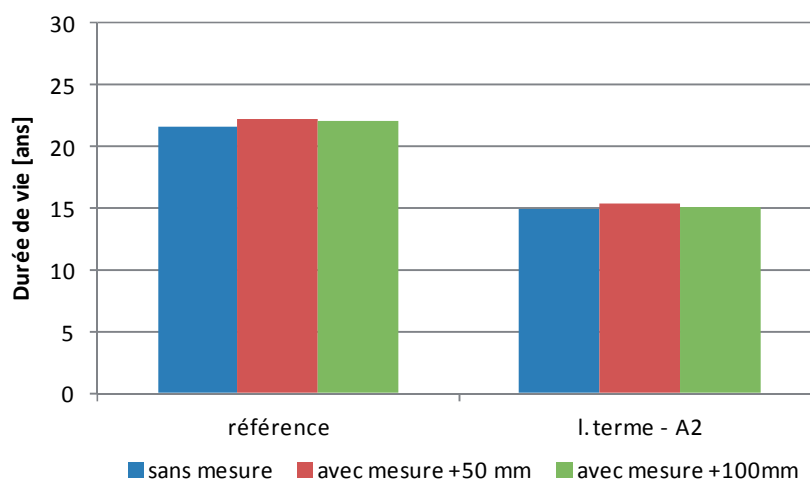
Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en enrobé, caractéristiques de superstructures, etc.). Notons que cette mesure ne touche pas les superstructures de type 2 avec un sol de fondation de classe S4, car ces cas ne présentent aucune couche en grave.

### Impact sur les performances des infrastructures routières

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation des épaisseurs des couches de grave" a fait l'objet d'une évaluation sommaire. En effet, les premiers résultats ayant montrés des impacts très faibles sur les durées de vie des chaussées, l'analyse n'a pas été effectuée pour tous les cas.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation restent faibles. Une faible augmentation de la durée de vie des chaussées avec la mise en place de la mesure peut être observée pour la plupart des cas. L'augmentation maximale de la durée de vie reste néanmoins inférieure à 3.5%, pour une augmentation de l'épaisseur de 50 mm ou de 100 mm. Certains cas présentent une diminution des durées de vie avec la mise en place de la mesure d'adaptation (superstructure de type 1 avec sol de fondation de classe S4 et trafic de classe T5 pour la région climatique "chaude"). Mais cette diminution reste très faible (inférieure à 1.6%).

Aucune tendance nette n'est observable par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de la couche de grave. En effet, pour certain cas l'augmentation de l'épaisseur de grave de 50 mm permet d'améliorer d'avantage la durée de vie des chaussées que pour une augmentation de l'épaisseur de 100 mm, alors que pour d'autres l'effet inverse se produit (Fig. 7.19).



**Fig. 7.19** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches de grave sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude").

Les changements des durées de vie observées sont trop faibles pour pouvoir détecter des tendances nettes par rapport aux deux régions climatiques et aux autres paramètres évalués (classe de trafic, classe de sol de fondation, scénario climatique, etc.).

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : De manière générale, légère diminution pour les cas évalués. Certains cas présentent une faible augmentation.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Aucune tendance nette observée par rapport à la fissuration avec et sans mesure d'adaptation.
- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Diminution avec la mise en place de la mesure d'adaptation. Mais en valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

**Analyse de risque et facteur de risque associé**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches de grave" a un impact négligeable sur le risque des chaussées suisses par rapport au phénomène de changement climatique. Ainsi, les facteurs de risque associés à la mesure restent identiques à l'état de référence, c.-à-d. sans mesure d'adaptation :

$$f_{CC,global,mesure\ 3} = f_{CC,global,sans} = 1.70 \quad \text{et donc} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 3} = 0.00$$

**Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches de grave" ne permet pas de diminuer le risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation. L'utilisation de cette mesure n'est donc pas recommandée.

**7.4.2.4. Mesure 4 : Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées**

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.4).

**Description et hypothèses de la mesure**

La mesure consiste à adapter les épaisseurs des couches stabilisées. Cette mesure ne concerne que les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) présentant des couches stabilisées.

La mesure a été divisée en deux variantes :

- a) Augmentation des épaisseurs des couches stabilisées de 20 mm.
- b) Augmentation des épaisseurs des couches stabilisées de 40 mm.

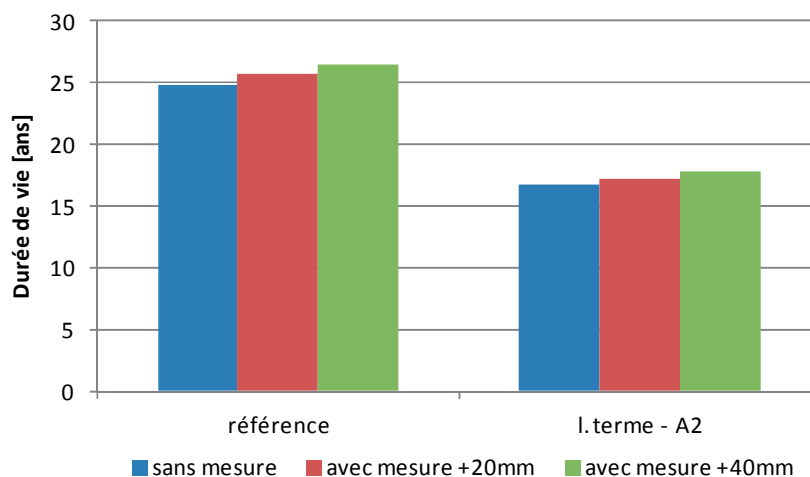
Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en enrobé, caractéristiques de superstructures, etc.). Pour le calcul du facteur de risque global et l'analyse de risque, les durées de vie issues de l'analyse générale ont été prises en considération pour les situations de risque avec une superstructure de type 1 ou 2 (Chapitre 7.3).

**Impact sur les performances des infrastructures routières**

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées" a fait l'objet d'une évaluation complète pour tous les cas avec une superstructure de type 5.

L'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué, même si la fissuration par fatigue du haut vers le bas présente plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est observée. Les autres performances (fissuration par fatigue du bas vers le haut et fissuration par fatigue des couches stabilisées) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation sont faibles à moyennes. Une augmentation de la durée de vie des chaussées avec la mise en place de la mesure peut être observée pour tous les cas, mais celle-ci reste inférieure à 15%. Une tendance à l'amélioration de la durée de vie est observée par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de la couche stabilisée (Fig. 7.20).



**Fig. 7.20** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches stabilisées sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 5 ; Région climatique "intermédiaire").

Les changements des durées de vie observées sont assez proches entre les deux régions climatiques pour les cas équivalents. La même constatation peut être faite pour les deux classes de trafic, les trois classes de sol de fondation et les trois scénarios climatiques.

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution faible à moyenne pour tous les cas évalués. L'impact est plus marqué pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur des couches stabilisées.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Augmentation pour tous les cas évalués. Diminution marquée des durées de vie pour les sols de fondation de classe S3 et S4 (entre 40 et 65% pour une augmentation de 40 mm) et diminution moyenne pour les sols de fondation de classe S2 (entre 30 et 40% pour une augmentation de 40 mm). Certains cas présentent une durée de vie inférieure à 20 ans (région climatique "chaude" avec sol de fondation de classe S2 et classe de trafic T6). L'impact est plus marqué pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur des couches stabilisées. Même avec des diminutions marquées des durées de vie, la fissuration par fatigue du haut vers le bas reste moins critique que l'orniérage total.
- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Aucune fissuration de ce genre ne se produit pour les superstructures de type 5.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Très faible augmentation (inférieure à 2% pour une augmentation de 40 mm et inférieure à 1% pour une augmentation de 20 mm) de la fissuration. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

### ***Analyse de risque et facteur de risque associé***

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées" permet de diminuer le risque de quelques situations de risque. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.12). Rappelons que pour le calcul du facteur de risque global et l'analyse de risque, les durées de vie issues de l'analyse générale ont été prises en considération pour les situations de risque avec une superstructure de type 1 ou 2 (Chapitre 7.3).

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |              |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2       |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme* | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |              |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2       |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme  | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

\* Risque très élevé pour la mesure 4 – a et élevé pour la mesure 4 – b

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

**Tab. 7.12** – Mesure 4 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

La différence entre les résultats des deux variantes de la mesure évaluées (augmentation de 20 mm et de 40 mm de l'épaisseur des couches stabilisées) est très faible. En effet, une unique situation de risque présente un niveau de risque différent entre les deux variantes de la mesure : il s'agit de la situation région "intermédiaire" – trafic T6 – Sol S2 – court-terme. Pour une augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches stabilisées, le risque est "très élevé" pour cette situation, alors qu'il est "élevé" pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur.

Pour les deux régions climatiques la diminution du risque touche uniquement une situation de risque par région. Pour les autres situations de risque évaluées la diminution du risque est nulle. La mise en place de la mesure d'adaptation ne permet pas de lutter correctement contre le risque lié au changement climatique dans les deux régions. Des mesures plus conséquentes ou la combinaison de plusieurs mesures sont nécessaires pour ramener le risque global à un niveau acceptable.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter faiblement la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 14.5 ans, respectivement 14.6 ans (sans mesure : 14.4 ans), pour une augmentation de 20 mm, respectivement 40 mm, de l'épaisseur des couches stabilisées. Le nombre de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans est de 82.6% pour les deux variantes de la mesure (sans mesure : 83.3%).

Les facteurs de risque associés à la mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées" sont les suivants :

$$f_{CC,global,mesure\ 4-a} = 1.65 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 4-a} = -0.05$$

$$f_{CC,global,mesure\ 4-b} = 1.63 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 4-b} = -0.07$$

Ces facteurs correspondent à une catégorie de risque se situant entre un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) et un niveau très élevé ( $f_{CC} = 2.0$ ). La diminution du risque grâce à la mesure est très faible ( $\Delta f_{CC,mesure\ 4-a} = -0.05$  et  $\Delta f_{CC,mesure\ 4-b} = -0.07$  ; diminution de 2.9% et 3.9%).

### **Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées" présente un changement très faible du risque par rapport au cas sans mesure. Le risque reste élevé à très élevé ( $f_{CC,global,mesure\ 4-a} = 1.65$  et  $f_{CC,global,mesure\ 4-b} = 1.63$ ). Cette mesure n'est pas assez conséquente pour les deux régions climatiques. En effet le changement du risque global est négligeable par rapport aux incertitudes de calcul. Ceci est dû, entre autres, au fait que la mesure ne s'intéresse qu'aux superstructures de type 5.

La mesure d'adaptation peut être mise en place assez facilement pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière. Mais étant donné le peu d'effet des résultats, il n'est pas recommandé de recourir à cette mesure quelque soit le cas évalué.

#### **7.4.2.5. Mesure 5 : Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F**

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.5).

### **Description et hypothèses de la mesure**

La mesure consiste à adapter les épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux. Cette mesure ne concerne que les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F) présentant des couches en AC F.

La mesure a été divisée en deux variantes :

- a) Augmentation des épaisseurs des couches de fondation en AC F de 20 mm.
- b) Augmentation des épaisseurs des couches de fondation en AC F de 40 mm.

Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en enrobé, caractéristiques de superstructures, etc.). Pour le calcul du facteur de risque global et l'analyse de risque, les durées de vie issues de l'analyse générale ont été prises en considération pour les situations de risque avec une superstructure de type 1 ou 5 (Chapitre 7.3).

### **Impact sur les performances des infrastructures routières**

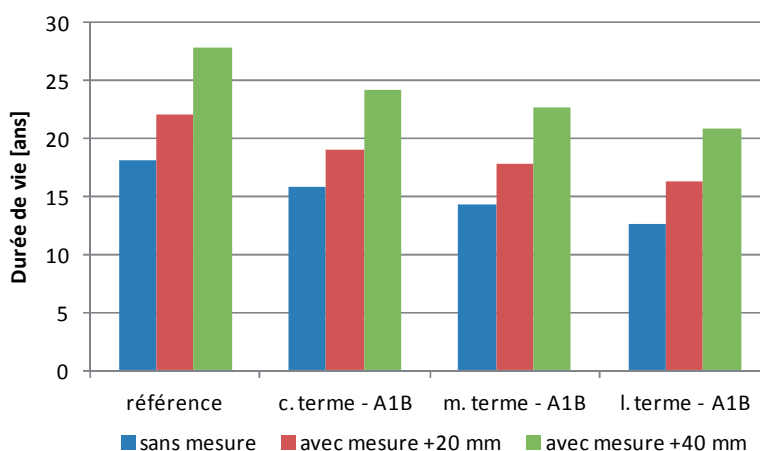
L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F" a fait l'objet d'une évaluation complète pour tous les cas avec une superstructure de type 2.

L'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué. Les autres performances (fissuration par fatigue du haut vers le bas et fissuration par fatigue du bas vers le haut) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation peuvent être très importantes. Une augmentation de la durée de vie des chaussées avec la mise en place de la mesure peut être observée pour tous les cas, avec des augmentations pouvant atteindre 40% pour

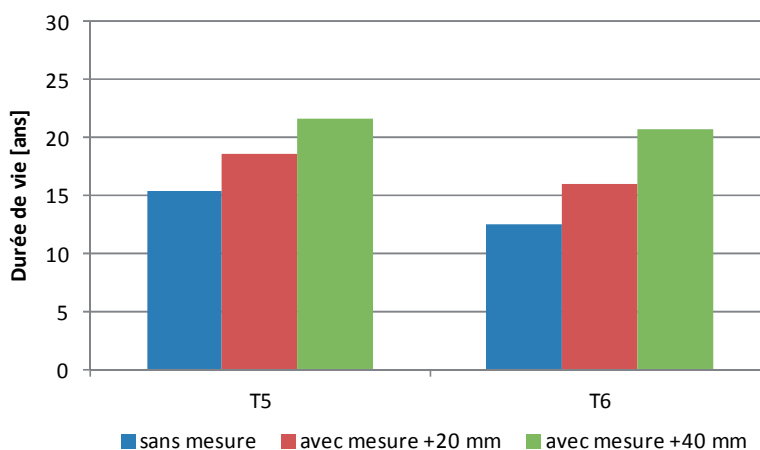


une augmentation de l'épaisseur de 20 mm et même 80% pour une augmentation de l'épaisseur de 40 mm. Une tendance à l'amélioration de la durée de vie est observée par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de la couche de fondation en enrobé bitumineux AC F (Fig. 7.21).



**Fig. 7.21** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches de fondation sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "chaude").

Les changements des durées de vie observées sont assez proches entre les deux régions climatiques pour les cas équivalents. La même constatation peut être faite pour les trois scénarios climatiques. Par rapport aux deux classes de trafic, une augmentation plus marquée des durées de vie est observée pour la classe T6 (Fig. 7.22). Par rapport aux trois classes de sol de fondation, une augmentation légèrement plus marquée des durées de vie est observée pour les sols de classe S2. Les sols de classe S3 et S4 présentent des augmentations proches.



**Fig. 7.22** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches de fondation sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme).

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution moyenne à forte pour tous les cas évalués. L'impact est plus marqué pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Diminution marquée pour tous les cas évalués. L'impact est plus marqué pour une augmentation de 80 mm de l'épaisseur des couches de

fondation. La fissuration par fatigue du haut vers le bas devient négligeable pour la totalité des cas évalués. Tous les cas ayant une durée de vie inférieure à 20 ans sans la mesure d'adaptation présentent des durées de vie largement supérieure à 20 ans avec la mesure d'adaptation.

- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Diminution marquée avec la mise en place de la mesure d'adaptation. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

### Analyse de risque et facteur de risque associé

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F" permet de diminuer le risque de plusieurs situations de risque évaluées. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque et pour les deux variantes de la mesure avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.13). Pour le calcul du facteur de risque global et l'analyse de risque, les durées de vie issues de l'analyse générale ont été prises en considération pour les situations de risque avec une superstructure de type 1 ou 5 (Chapitre 7.3).

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +40 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +40 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.13 – Mesure 5 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

La différence entre les résultats des deux variantes de la mesure évaluées (augmentation de 20 mm et de 40 mm de l'épaisseur des couches de fondation) est non négligeable. En effet, plusieurs situations de risque présentent un niveau de risque inférieur pour une augmentation de 40 mm.

Pour la région "intermédiaire" la diminution du risque est marquée pour les cas avec un trafic de classe T5. Pour les autres situations de risque évaluées la diminution du risque est moyenne à faible. Grâce à la mise en place de la mesure le risque lié au changement climatique peut être diminué de manière moyenne dans cette région.

Pour la région "chaude" le risque reste élevé ou très élevé pour la plupart des situations de risque, à l'exception des situations avec un trafic T5 et un sol de fondation de classe S4. Pour ces dernières le risque peut être diminué de manière non négligeable avec le passage d'un risque élevé sans mesure d'adaptation à un risque faible ou moyen avec mesure. La mise en place de la mesure ne permet pas de lutter intégralement contre le risque lié au changement climatique dans cette région, surtout pour les cas avec un trafic de classe T6. Pour la région "chaude" des mesures plus conséquentes ou la combinaison de plusieurs mesures sont nécessaires.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 15.7 ans, respectivement 17.3 ans (sans mesure : 14.4 ans), pour une augmentation de 20 mm, respectivement 40 mm, de l'épaisseur des couches de fondation en AC F. Le nombre de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans est de 75.2%, respectivement 63.3% (sans mesure : 83.3%).

Les facteurs de risque associés à la mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F" sont les suivants :

$$f_{CC,global,mesure\ 5-a} = 1.55 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 5-a} = -0.15$$

$$f_{CC,global,mesure\ 5-b} = 1.42 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 5-b} = -0.28$$

Ces facteurs correspondent à une catégorie de risque se situant entre un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) et un niveau très élevé ( $f_{CC} = 2.0$ ) pour une augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches de fondation, et une catégorie de risque se situant entre un niveau moyen ( $f_{CC} = 1.0$ ) et un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur. La diminution du risque grâce à la mesure est faible à moyenne ( $\Delta f_{CC,mesure\ 5-a} = -0.15$  et  $\Delta f_{CC,mesure\ 5-b} = -0.28$  ; diminution de 8.8% et 16.7%).

### **Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F" présente un changement faible à moyen du risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation. Le risque reste élevé à très élevé pour une augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches de fondation ( $f_{CC,global,mesure\ 5-a} = 1.55$ ) et moyen à élevé pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur ( $f_{CC,global,mesure\ 5-b} = 1.42$ ). Pour certaines situations de risque cette mesure d'adaptation correspond à une variante intéressante, principalement pour la région climatique "intermédiaire". Pour la région "chaude" cette mesure n'est pas assez conséquente.

La mesure d'adaptation peut être mise en place assez facilement pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière. L'augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches de fondation n'apporte que peu d'amélioration, une augmentation d'au moins 40 mm peut donc être recommandée pour certains cas spécifiques. L'augmentation de 40 mm des épaisseurs permet encore de satisfaire aux recommandations des normes suisses par rapport aux épaisseurs maximales des couches de fondation (SN 670 430b [149]).

#### 7.4.2.6. Mesure 6 : Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.6).

##### Description et hypothèses de la mesure

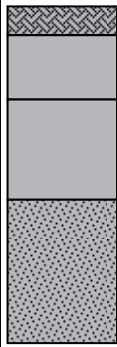
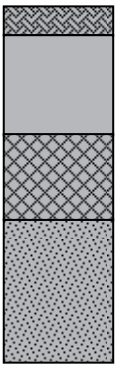
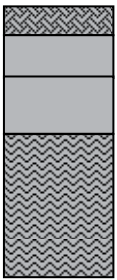
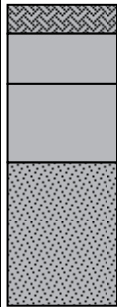
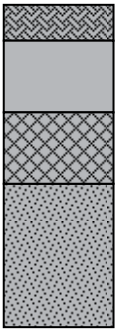
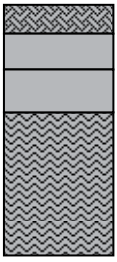
La mesure consiste à adapter les épaisseurs des couches bitumineuses. Cette mesure s'intéresse à tous les types de superstructures. La mesure a été divisée en trois variantes :

- a) Augmentation des épaisseurs des couches bitumineuses de 20 mm.
- b) Augmentation des épaisseurs des couches bitumineuses de 40 mm.
- c) Diminution des épaisseurs des couches bitumineuses de 20 mm.

La dernière variante (variante c) n'est pas vraiment une mesure d'adaptation. Celle-ci a néanmoins été intégrée dans le but de vérifier le comportement des chaussées sous-dimensionnées.

Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en grave, caractéristiques de superstructures, etc.).

L'adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses se fait uniquement en changeant les épaisseurs des couches de base (AC T) respectives. Toutes les valeurs spécifiques des matériaux composant ces couches sont reprises de l'analyse générale (Annexe 10.3.1.5). Dans la figure ci-après est donné un aperçu des différents types de couches bitumineuses évaluées avec leurs épaisseurs relatives (Fig. 7.23).

| Classe de trafic | Superstructure 1   | Superstructure 2  | Superstructure 5  |
|------------------|--|---|---|
| T6               |  <p>40 mm AC 11<br/>90 mm AC B 22<br/>120 – 180 mm AC T 32<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC 11<br/>120 – 180 mm AC T 32<br/>110 – 140 mm AC F 32<br/>0 – 300 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC 11<br/>60 mm AC B 16<br/>60 – 120 mm AC T 22<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p> |
| T5               |  <p>40 mm AC 11<br/>70 mm AC B 22<br/>90 – 150 mm AC T 32<br/>150 – 400 mm Grave</p>  |  <p>50 mm AC 11<br/>80 – 140 mm AC T 22<br/>90 – 110 mm AC F 22<br/>0 – 300 mm Grave</p>   |  <p>40 mm AC 11<br/>50 mm AC B 16<br/>40 – 100 mm AC T<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p>    |

**Commentaires :** Selon DARWin-ME : Min 2 couches non-liées nécessaires

Pour S4-SS2 et S2-SS5 à S4-SS5 : La plateforme est divisée en deux couches avec des propriétés identiques (première couche 1000 mm, deuxième couche infinie)

Selon DARWin-ME : Max 3 couches liées possibles

Pour T5-SS2 et T6-SS2 : La couche de liaison est supprimée

**Fig. 7.23** – Types de couches bitumineuses évaluées et variation des épaisseurs.

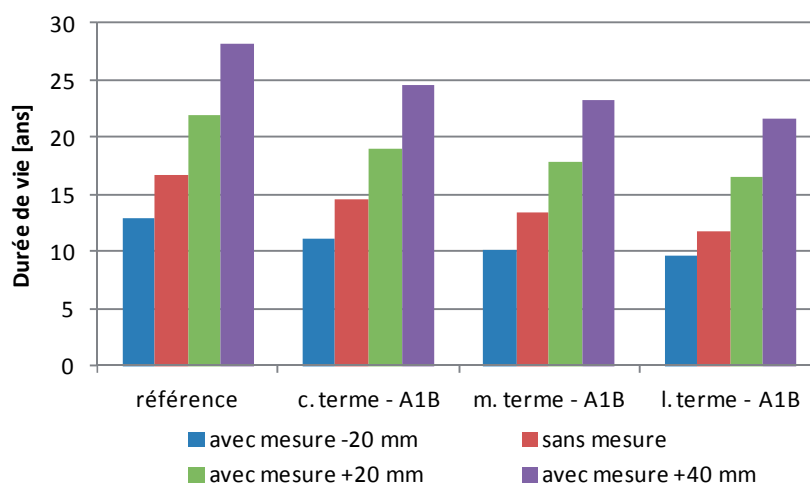
L'adaptation des épaisseurs des couches de base AC T implique que pour certains cas les recommandations des normes par rapport aux épaisseurs minimales et maximales ne sont plus respectées (selon SN 670 430b [149] : épaisseur AC T 22 entre 60 et 100 mm ; épaisseur AC T 31 entre 90 et 140 mm).

### **Impact sur les performances des infrastructures routières**

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses" a fait l'objet d'une évaluation complète. Pour les cas avec une augmentation des épaisseurs des couches bitumineuses l'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué, mais la fissuration par fatigue du haut vers le bas présente encore plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est observée. Pour les cas avec une diminution des épaisseurs, la fissuration par fatigue du haut vers le bas peut devenir la performance critique pour certains cas (superstructure de type 1 ou 2 avec sol de fondation S4, trafic T5 et région climatique "chaude").

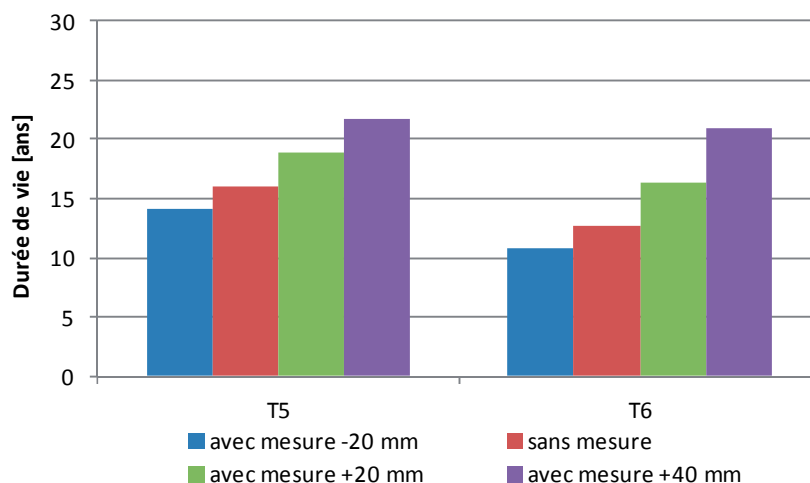
Les autres performances (fissuration par fatigue du bas vers le haut et fissuration par fatigue des couches stabilisées) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation quelque soit le cas évalué, même si pour certains cas la fissuration par fatigue du bas vers le haut présente une durée de vie inférieure à 20 ans (uniquement pour les cas avec une diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses).

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation peuvent être très importantes. Une augmentation de la durée de vie des chaussées avec l'augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses peut être observée pour tous les cas. Ces augmentations peuvent atteindre les 40% pour une augmentation de l'épaisseur de 20 mm et même les 85% pour une augmentation de l'épaisseur de 40 mm. La diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses est par contre accompagnée par une diminution des durées de vie de tous les cas évalués (Fig. 7.24).



**Fig. 7.24** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "chaude").

Les changements des durées de vie observés sont assez proches entre les deux régions climatiques pour les cas équivalents. La même constatation peut être faite pour les trois scénarios climatiques. Par rapport aux deux classes de trafic, une augmentation plus marquée des durées de vie est observée pour la classe T6 (Fig. 7.25). Par rapport aux trois classes de sol de fondation, aucune tendance globale nette n'est observée. Si pour une superstructure de type 1 ou 2, une augmentation légèrement plus marquée des durées de vie est observée pour les sols de classe S2, pour la superstructure de type 5 les augmentations sont proches entre tous les sols de fondation.



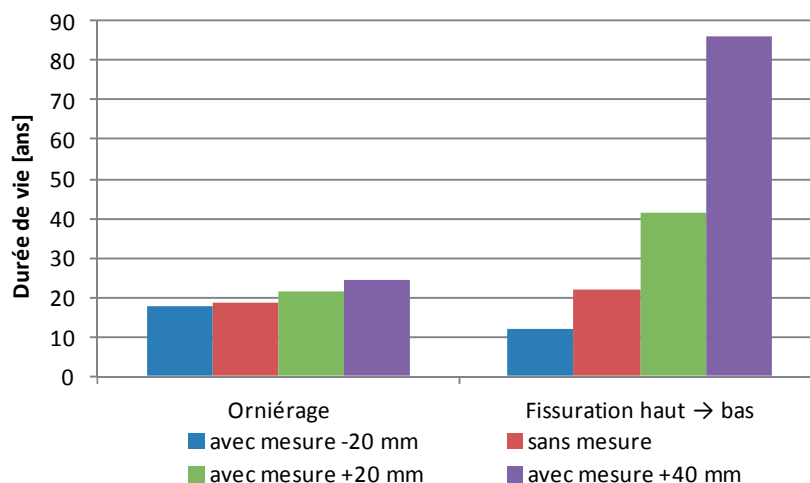
**Fig. 7.25** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme).

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution moyenne à forte pour tous les cas évalués avec une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses. Augmentation pour les cas avec une diminution de l'épaisseur des couches bitumineuse. L'impact est plus marqué pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Pour les cas avec une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses, diminution marquée de la fissuration pour les cas avec une superstructure de type 1 ou 2 et augmentation de la fissuration pour les cas avec une superstructure de type 5. L'impact est plus marqué pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses. La fissuration par fatigue du haut vers le bas devient négligeable pour les cas avec une superstructure de type 1 ou 2, mais continue à présenter des cas avec une durée de vie inférieure à 20 ans pour les cas avec une superstructure de type 5.

Pour les cas avec une diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses, l'effet inverse s'observe par rapport à la diminution des épaisseurs. La fissuration par fatigue du haut vers le bas devient critique pour certains cas (superstructure de type 1 ou 2 avec sol de fondation S4, trafic T5 et région climatique "chaude") (Fig. 7.26).

- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : La fissuration par fatigue du bas vers le haut présente un comportement identique à la fissuration par fatigue du haut vers le bas. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique pour les cas avec une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses. Par contre pour les cas avec une diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses, certains peuvent présenter une durée de vie inférieure à 20 ans.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Légère augmentation pour les cas avec une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses (inférieure à 2%) et légère diminution de la fissuration pour les cas avec une diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses (inférieure à 1%). En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.



**Fig. 7.26** – Impact de l'adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme).

### **Analyse de risque et facteur de risque associé**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses" permet de diminuer de manière importante le risque de plusieurs situations de risque évaluées. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque et pour les trois variantes de la mesure (augmentation de l'épaisseur de 20 mm et 40 mm et diminution de 20 mm) avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.14).

La différence entre les résultats des trois variantes de la mesure évaluées peut être très importante. En effet, plusieurs situations de risque présentent un niveau de risque inférieur pour une augmentation de 40 mm de l'épaisseur.

Pour la région "intermédiaire" la diminution du risque est marquée pour les cas avec augmentation de l'épaisseur de 20 mm et très marquée pour les cas avec une augmentation de 40 mm. Grâce à la mise en place de la mesure d'adaptation avec une augmentation de l'épaisseur de 40 mm le risque lié au changement climatique peut être diminué de manière considérable dans cette région. En effet, uniquement les situations de risque avec un sol de fondation de classe S2 et avec un trafic T6 présentent encore un risque moyen à élevé. La diminution de l'épaisseur de 20 mm est, comme attendu, accompagnée d'une dégradation marquée du risque pour toutes les situations de risque.

Pour la région "chaude" le risque reste élevé ou très élevé pour toutes les situations de risque avec un trafic T6. Pour un trafic T5, le risque peut-être diminué de manière non négligeable avec l'augmentation de 40 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses. La mise en place de la mesure d'adaptation ne permet pas de lutter intégralement contre le risque lié au changement climatique dans cette région, surtout pour les cas avec un trafic de classe T6. Pour la région "chaude" des mesures plus conséquentes ou la combinaison de plusieurs mesures demeurent nécessaires.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 16.9 ans, respectivement 20.1 ans (sans mesure : 14.4 ans), pour une augmentation de 20 mm, respectivement 40 mm, de l'épaisseur des couches bitumineuses. L'on peut remarquer que pour une augmentation de l'épaisseur de 40 mm, le seuil des 20 ans est légèrement dépassé. Le nombre de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans est de 67.8%, respectivement 49.3% (sans mesure : 83.3%). Pour une diminution de 20 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses, une durée de vie moyenne de 12.9 ans est observée, avec 93.3% de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans.

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +40 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec -20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec +40 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec -20 mm   | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.14 – Mesure 6 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.



Les facteurs de risque associés à la mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses" sont les suivants :

$$f_{CC,global,mesure\ 6-a} = 1.33 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 6-a} = -0.37$$

$$f_{CC,global,mesure\ 6-b} = 0.98 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 6-b} = -0.72$$

$$f_{CC,global,mesure\ 6-c} = 1.85 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 6-c} = +0.15$$

Ces facteurs correspondent à des catégories de risque se situant entre un niveau moyen ( $f_{CC} = 1.0$ ) et un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) pour une augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses, et entre un niveau faible ( $f_{CC} = 0.5$ ) et un niveau moyen ( $f_{CC} = 1.0$ ) pour une augmentation de 40 mm. La diminution du risque grâce à la mesure d'adaptation est moyenne à importante ( $\Delta f_{CC,mesure\ 6-a} = -0.37$  et  $\Delta f_{CC,mesure\ 6-b} = -0.72$  ; diminution de 21.6% et 42.2%).

Pour une diminution de 20 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses, le facteur de risque correspond à une catégorie de risque se situant entre un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) et un niveau très élevé ( $f_{CC} = 2.0$ ). L'augmentation du risque due à la "mesure" est non négligeable ( $\Delta f_{CC,mesure\ 6-c} = +0.15$  ; augmentation de 8.8%).

### **Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses" peut présenter un changement conséquent du risque par rapport aux cas sans mesure d'adaptation. Le risque peut passer dans la catégorie faible à moyenne pour une augmentation de l'épaisseur de 40 mm ( $f_{CC,global,mesure\ 6-b} = 0.98$ ). Pour certaines situations de risque cette mesure d'adaptation correspond à une variante très intéressante, principalement pour la région climatique "intermédiaire" et pour la région climatique "chaude" avec un trafic T5. Pour un trafic T6 cette mesure n'est par contre pas assez conséquente pour cette dernière région.

Pour une augmentation de l'épaisseur des couches bitumineuses de 20 mm, le risque passe dans la catégorie moyenne à élevée ( $f_{CC,global,mesure\ 6-a} = 1.33$ ). Pour certaines situations de risque cette mesure d'adaptation correspond à une variante intéressante, principalement pour la région climatique "intermédiaire" avec un trafic T5 ou avec un trafic T6 et des sols de fondation de classe S3 ou S4. Pour la région climatique "chaude" cette mesure n'est pas assez conséquente.

Par contre, la diminution de l'épaisseur des couches bitumineuses a évidemment une influence négative sur le risque, celui-ci restant dans la catégorie élevée à très élevée ( $f_{CC,global,mesure\ 6-c} = 1.85$ ). Cette mesure n'est donc pas recommandée. Le risque lié à un sous-dimensionnement des chaussées peut donc avoir des conséquences très marquées sur leurs durées de vie correspondantes.

La mesure d'adaptation peut être mise en place assez facilement pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière, mais se trouve être très onéreuse. L'augmentation de 20 mm de l'épaisseur des couches bitumineuses n'apporte que peu d'amélioration, une augmentation d'au moins 40 mm peut donc être recommandée pour certains cas spécifiques.

### **7.4.3. Changement des paramètres des matériaux**

Le changement des paramètres des matériaux composant les chaussées routières peut se traduire de manières différentes. Ainsi dans le cadre de cette thèse, différentes mesures d'adaptation ont été évaluées. Ces mesures sont décrites dans les chapitres à suivre (Chapitres 7.4.3.1 à 7.4.3.3).

#### *7.4.3.1. Mesure 7 : Adaptation du grade des liants composant les couches de surface*

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.7).

### Description et hypothèses de la mesure

La mesure consiste à adapter le grade des liants composant les couches de surface. Cette mesure s'intéresse à tous les types de superstructures. L'adaptation du grade des liants se traduit par le passage à un grade plus dur, dans l'objectif d'augmenter la résistance à l'orniérage des couches de surface.

Cette mesure ne s'intéresse uniquement aux couches de surface AC 11. Ainsi les liants évalués pour l'analyse générale, présentant un grade 50/70, sont adaptés en un grade 35/50. Toutes les autres valeurs spécifiques des matériaux composant ces couches sont reprises de l'analyse générale (Annexe 10.3.1.5). Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en grave, caractéristiques de superstructures, etc.).

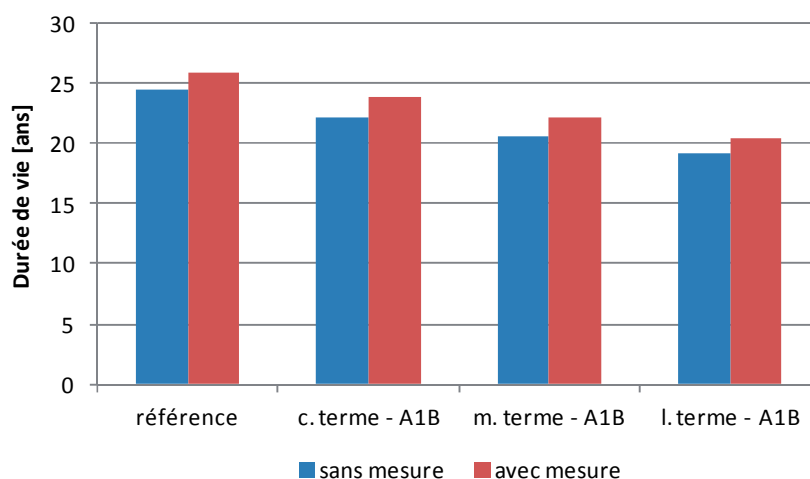
L'utilisation d'un liant plus dur satisfait les recommandations des normes par rapport au choix des liants (selon SN 640 431-1b [119] : l'utilisation d'un liant 35/50 est autorisée pour certains cas spécifiques).

### Impact sur les performances des infrastructures routières

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation du grade des liants composant les couches de surface" a fait l'objet d'une évaluation complète. L'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué, mais la fissuration par fatigue du haut vers le bas présente encore plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est observée.

Les autres performances (fissuration par fatigue du bas vers le haut et fissuration par fatigue des couches stabilisées) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation quelque soit le cas évalué. En effet, tous les cas présentent des durées de vie supérieure à 20 ans.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation restent plutôt faibles. Une augmentation de la durée de vie des chaussées avec le passage des liants à un grade plus dur peut être observée pour tous les cas. Ces augmentations ne dépassent par contre pas les 15% (Fig. 7.29).



**Fig. 7.27** – Impact de l'adaptation du grade des liants composant les couches de surface sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 2 ; Région climatique "intermédiaire").

Les changements des durées de vie observés sont assez proches entre les deux régions climatiques pour les cas équivalents. La même constatation peut être faite pour les trois scénarios climatiques, les deux classes de trafic et les trois classes de sol de fondation.

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution faible pour tous les cas évalués.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Diminution faible pour les cas avec une superstructure de type 1 ou 2 (inférieure à 15%) et faible augmentation pour les cas avec une superstructure de type 5 (inférieure à 15%). La fissuration par fatigue du haut vers le bas continue à présenter certains cas avec une durée de vie inférieure à 20 ans.
- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : La fissuration ne présente aucune tendance nette par rapport au changement du grade des liants. En effet, certains cas présentent une faible diminution de la fissuration, alors que d'autres présentent une très faible augmentation. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique pour tous les cas évalués.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Aucun changement n'est observé. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

### Analyse de risque et facteur de risque associé

La mesure d'adaptation "Adaptation du grade des liants composant les couches de surface" ne permet de diminuer le risque que faiblement et seulement pour certaines situations de risque spécifiques. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.15).

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.15 – Mesure 7 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

Pour la région "intermédiaire" la diminution du risque est faible. La mise en place de la mesure d'adaptation ne diminue que de manière très limitée le risque lié au changement climatique dans cette région. Pour la région "chaude" le risque reste élevé ou très élevé pour toutes les situations de risque à l'exception du cas trafic T6 – Sol S4 – court-terme où un risque faible est prévu.

La mise en place de la mesure d'adaptation ne permet pas de lutter efficacement contre le risque lié au changement climatique pour les deux régions. Des mesures différentes ou la combinaison de plusieurs mesures demeurent nécessaires.

La mesure permet d'augmenter très faiblement la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 15.1 ans (sans mesure : 14.4 ans). Le nombre de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans reste très élevé (avec mesure : 78.5% ; sans mesure : 83.3%).

Le facteur de risque associé à la mesure d'adaptation "Adaptation du grade des liants composant les couches de surface" est le suivant :

$$f_{CC,global,mesure\ 7} = 1.57 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 7} = -0.13$$

Ce facteur correspond à une catégorie de risque se situant entre un niveau élevé ( $f_{CC} = 1.5$ ) et un niveau très élevé ( $f_{CC} = 2.0$ ). La diminution du risque grâce à la mesure d'adaptation est faible ( $\Delta f_{CC,mesure\ 7} = -0.13$  ; diminution de 7.8%).

### **Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation du grade des liants composant les couches de surface" présente un changement très faible du risque par rapport aux cas sans mesure d'adaptation. Le risque reste élevé à très élevé ( $f_{CC,global,mesure\ 7} = 1.57$ ). Cette mesure n'est pas assez conséquente pour les deux régions climatiques.

La mesure d'adaptation peut être mise en place assez facilement pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière. Le recours à cette mesure est néanmoins recommandé pour les deux régions climatiques si d'autres mesures plus conséquentes ne veulent ou ne peuvent être prises.

#### **7.4.3.2. Mesure 8 : Adaptation du type de liant : Utilisation d'un bitume polymère PmB**

Les résultats de calcul détaillés de l'évaluation de la durée de vie à l'aide de DARWin-ME peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.8).

### **Description et hypothèses de la mesure**

La mesure consiste à adapter le type de liants composant les différentes couches des chaussées. Cette mesure s'intéresse à tous les types de superstructures. L'adaptation du type de liants se traduit par le remplacement des liants routiers standards par des liants modifiés aux polymères (PmB). L'objectif étant d'augmenter la résistance à l'orniérage des différentes couches bitumineuses des chaussées.

La mesure a été divisée en trois variantes :

- a) Utilisation d'un PmB pour la couche de surface AC uniquement.
- b) Utilisation d'un PmB pour la couche de surface AC et la couche de liaison AC B (uniquement superstructures de type 1 et 5).
- c) Utilisation d'un PmB pour la couche de surface AC, la couche de liaison AC B et la couche de base AC T.

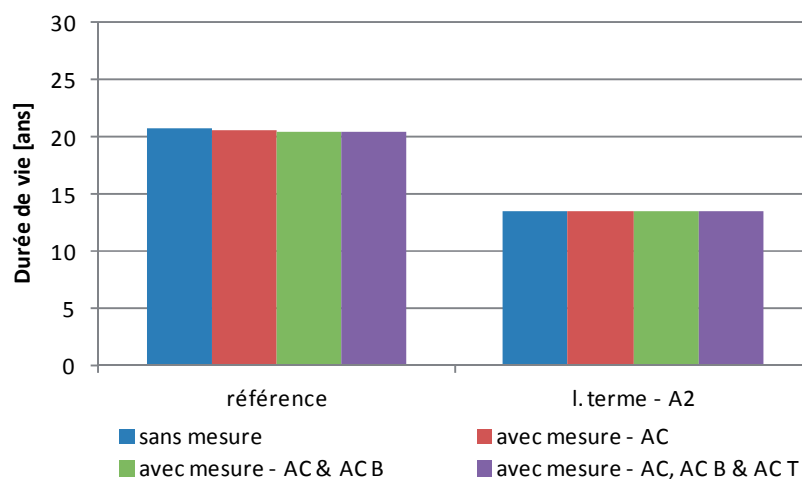
Le choix du type de PmB s'est fait à l'aide des normes suisses (SN 640 431-1b [119]). Ainsi pour les couches de surface et les couches de liaison un bitume-polymères PmB 45/80-50 a été retenu et pour les couches de base un bitume-polymères PmB 25/55-55. Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en grave, caractéristiques de superstructures, etc.).

### Impact sur les performances des infrastructures routières

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation du type de liant : Utilisation d'un bitume polymère PmB" a fait l'objet d'une évaluation sommaire. En effet, les premiers résultats ayant montrés des impacts très faibles sur les durées de vie des chaussées suisses, l'analyse n'a pas été effectuée pour tous les cas.

L'orniérage reste la performance critique quelque soit le cas évalué, mais la fissuration par fatigue du haut vers le bas présente plusieurs cas où une durée de vie inférieure à 20 ans est observée. Les autres performances (fissuration par fatigue du bas vers le haut et fissuration par fatigue des couches stabilisées) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation quelque soit le cas évalué.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation restent très faibles. Aucune tendance nette de la durée de vie avec la mise en place de la mesure n'est observée. En effet, certains cas présentent une très faible augmentation de la durée de vie alors que d'autre présentent une très faible diminution de celle-ci. Mais les différences sont très faibles et peuvent ainsi être négligées. En outre, aucune tendance nette n'est observée par rapport aux trois variantes de la mesure (Fig. 7.28).



**Fig. 7.28** – Impact de l'adaptation du type de liant sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 5 ; Région climatique "chaude").

L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Aucune tendance nette n'est observée. L'impact de la mesure sur l'orniérage est quasiment nul.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Aucune tendance nette n'est observée pour les mesures 8 – a et 8 – b. L'impact de la mesure sur la fissuration est quasiment nul pour ces cas. Pour la mesure 8 – c une faible augmentation de la fissuration peut être observée. Mais celle-ci ne devient pas critique par rapport à l'orniérage.
- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Aucune tendance nette n'est observée pour les mesures 8 – a et 8 – b. L'impact de la mesure sur la fissuration est quasiment nul pour ces cas. Pour la mesure 8 – c une faible augmentation de la fissuration peut être observée. Mais en valeurs absolues celle-ci reste très faible et non critique.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Aucune tendance nette n'est observée. L'impact de la mesure sur la fissuration est quasiment nul. En valeurs absolues celle-ci reste très faible et non critique.

**Analyse de risque et facteur de risque associé**

La mesure d'adaptation "Adaptation du type de liant : Utilisation d'un bitume polymère PmB" a un impact négligeable sur le risque des chaussées suisses par rapport au phénomène de changement climatique. Ainsi, le facteur de risque associé à la mesure reste identique à l'état de référence, c.-à-d. sans mesure d'adaptation :

$$f_{CC,global,mesure\ 8-x} = f_{CC,global,sans} = 1.70 \quad \text{et donc} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 8-x} = 0.00$$

**Commentaires et conclusions**

La mesure d'adaptation "Adaptation du type de liant : Utilisation d'un bitume polymère PmB" ne permet pas de diminuer le risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation. L'utilisation de cette mesure n'est donc pas recommandée.

La prise en compte correcte des liants modifiés aux polymères dans l'outil DARWin-ME devrait être vérifiée plus en détail par une étude complémentaire. Celle-ci n'a malheureusement pas pu être réalisée dans le cadre de la thèse.

**7.4.3.3. Mesure 9: Adaptation de la superstructure : Utilisation d'un enrobé à module élevé (AC EME) et d'un enrobé macrorugueux (AC MR)**

Les résultats de calcul détaillés (résultats DARWin-ME et analyse de risque) peuvent être consultés en annexe (Annexe 10.5.9).

**Description et hypothèses de la mesure**


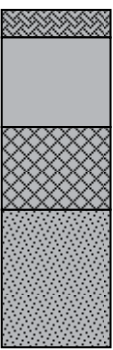
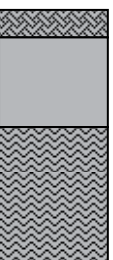
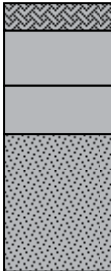
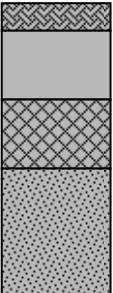
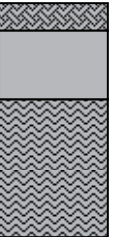
La mesure consiste à adapter intégralement la superstructure des chaussées. Cette mesure s'intéresse à tous les types de superstructures et se traduit par l'utilisation de matériaux à haute performance pour les différentes couches des revêtements. Ainsi la couche de surface standard (AC 11) est remplacée par une couche d'enrobé macrorugueux (AC MR 11) et les couches de liaison et de base sont remplacées par des couches d'enrobés à module élevé (AC EME 22 C1 et AC EME 22 C2). Les principales caractéristiques de ces matériaux sont données dans le tableau ci-après (Tab. 7.16).

| Caractéristique  | AC MR 11                                  | AC EME 22 C1                      | AC EME 22 C2                      |
|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Propriétés principales</b>                                | Résistance à l'orniérage                  | Résistance à l'orniérage          | Résistance à la fatigue           |
| <b>Teneur en vides [%]</b>                                   | 8.0                                       | 3.0                               | 2.0                               |
| <b>Teneur en liant [%]</b>                                   | 6.0                                       | 4.6                               | 5.2                               |
| <b>Module complexe à 15°C, 10 Hz [MPa]</b>                   | 4500                                      | 13'000                            | 16'000                            |
| <b>Liant</b>   | Bitume modifié par polymères PmB 45/80-65 | Bitume routier de grade dur 15/25 | Bitume routier de grade dur 10/20 |
| <b>Valeurs de portance (coefficient <math>\sigma</math>)</b> | 4.0                                       | 4.4                               | 5.6                               |

**Tab. 7.16** – Mesure 9 – Caractéristiques principales des matériaux bitumineux.

Les autres paramètres restent inchangés (épaisseurs des couches en grave, portance des sols de fondation, etc.).

L'utilisation de matériaux à haute performance permet, selon la norme de dimensionnement suisse (SN 640 324b [114]), d'adapter les épaisseurs des couches bitumineuses à l'aide de leur Structural Number (SN). En effet, les couches d'enrobés à module élevé présentent des valeurs de portance supérieures aux couches bitumineuses standards (valeur de portance = 4.0 pour les enrobés standards ; valeur de portance pour les enrobés à module élevé selon Tab. 7.16). Ainsi des épaisseurs légèrement plus faibles des couches bitumineuses peuvent être mises en place pour une portance identique. Dans la figure ci-après est donné un aperçu des différents types de couches bitumineuses évaluées avec leurs épaisseurs relatives (Fig. 7.29).

| Classe de trafic | Superstructure 1  | Superstructure 2  | Superstructure 5  |
|------------------|---|---|---|
| T6               |  <p>40 mm AC MR 11<br/>110 mm AC EME 22 C1<br/>80 mm AC EME 22 C2<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC MR 11<br/>130 mm AC EME 22 C1<br/>110 – 140 mm AC F 32<br/>0 – 300 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC MR 11<br/>130 mm AC EME 22 C1<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p>  |
| T5               |  <p>40 mm AC MR 11<br/>80 mm AC EME 22 C1<br/>70 mm AC EME 22 C2<br/>150 – 400 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC MR 11<br/>100 mm AC EME 22 C1<br/>90 – 110 mm AC F 22<br/>0 – 300 mm Grave</p> |  <p>40 mm AC MR 11<br/>100 mm AC EME 22 C1<br/>160 – 300 mm Stabilisation aux liants hydraul.</p> |

**Commentaires :** Selon DARWin-ME : Min 2 couches non-liées nécessaires

Pour S4-SS2 et S2-SS5 à S4-SS5 : La plateforme est divisée en deux couches avec des propriétés identiques (première couche 1000 mm, deuxième couche infinie)

**Fig. 7.29** – Mesure 9 – Adaptation des types de couches bitumineuses évaluées et variation des épaisseurs.

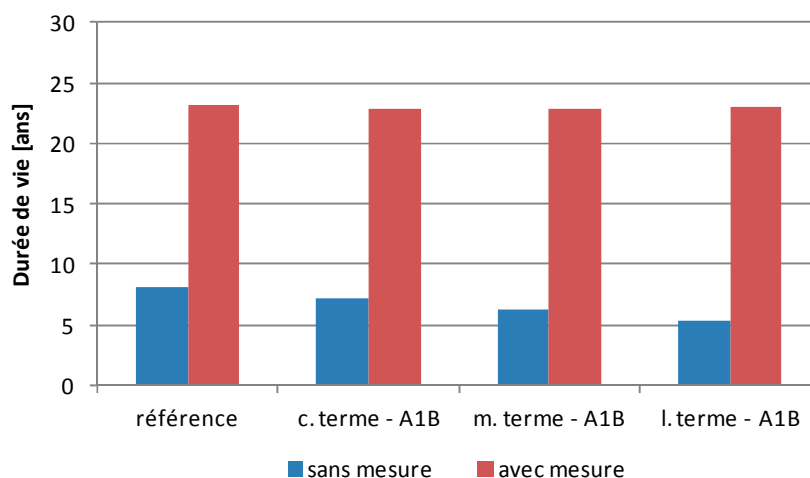
L'adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses implique que pour certains cas les recommandations des normes par rapport aux épaisseurs minimales et maximales ne sont plus respectées (SN 670 430b [149]).

### **Impact sur les performances des infrastructures routières**

L'analyse de l'impact de la mise en place de la mesure "Adaptation de la superstructure" a fait l'objet d'une évaluation complète. L'orniérage reste la performance critique pour la plupart des cas évalué, mais la fissuration par fatigue du haut vers le bas peut devenir la performance critique pour certains cas (superstructure de type 2 avec sol de fondation S3 ou S4, trafic T5 et région climatique "chaude"). Ces performances critiques présentent néanmoins une durée de vie toujours supérieure à 20 ans.

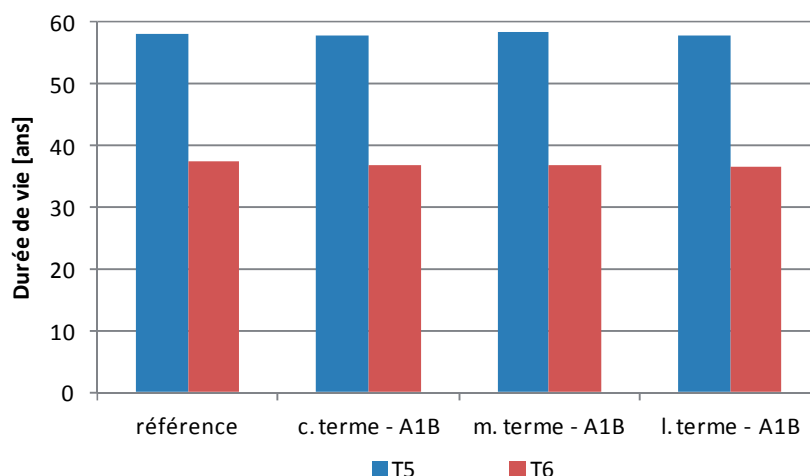
Les autres performances (fissuration par fatigue du bas vers le haut et fissuration par fatigue des couches stabilisées) ne deviennent pas des performances critiques avec cette mesure d'adaptation quelque soit le cas évalué.

Les différences entre les durées de vie des chaussées sans et avec mesure d'adaptation sont considérables. Une augmentation de la durée de vie des chaussées peut être observée pour tous les cas avec l'utilisation des revêtements à haute performance. Ces augmentations dépassent toujours les 100% et peuvent atteindre dans certains cas les 400% (Fig. 7.30).



**Fig. 7.30** – Impact de l'adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Trafic T6 ; Sol de fondation S2 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude").

Les changements des durées de vie observés sont plus élevés pour la région climatique "chaude" que pour la région climatique "intermédiaire". Par contre les différences entre les changements observés par rapport aux trois scénarios climatiques et aux différentes périodes d'analyses sont très faibles. Ainsi, pour certains cas le changement climatique ne semble avoir qu'un impact très faible sur la durée de vie des chaussées (superstructures de type 1 ou 2 avec un trafic T5). Pour les autres cas, une faible diminution des durées de vie avec les périodes d'analyses peut être observée, mais celle-ci ne dépasse pas les 8% (Fig. 7.31).



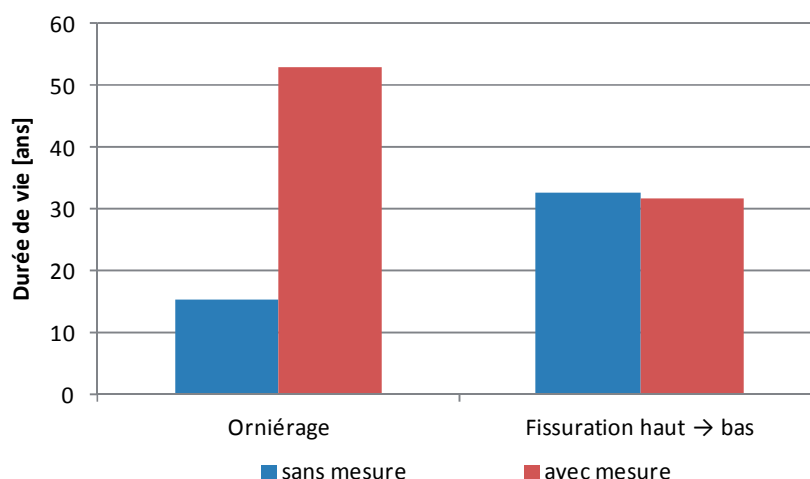
**Fig. 7.31** – Impact de l'adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Sol de fondation S4 ; Type de superstructure 1 ; Région climatique "chaude").

Par rapport aux deux classes de trafic, une augmentation plus marquée des durées de vie est observée pour la classe T6. Par rapport aux trois classes de sol de fondation, aucune tendance globale nette n'est observée.



L'impact de la mesure d'adaptation sur les différentes performances des chaussées présente les caractéristiques suivantes :

- Orniérage total : Diminution très marquée pour tous les cas évalués.
- Fissuration par fatigue du haut vers le bas : Diminution très marquée pour les superstructures de type 1 et 5. La fissuration devient négligeable pour ces cas. Pour les superstructures de type 2 une faible augmentation peut être observée. Ceci a pour conséquence que la fissuration par fatigue du haut vers le bas devient critique pour certains cas (sol de fondation S3 ou S4, trafic T5 et région climatique "chaude") (Fig. 7.32).



**Fig. 7.32** – Impact de l'adaptation de la superstructure sur la durée de vie des chaussées (Trafic T5 ; Sol de fondation S3 ; Type de superstructure 2 ; Scénario climatique A1B ; Région climatique "chaude" ; Période à long terme).

- Fissuration par fatigue du bas vers le haut : Diminution très marquée quelque soit le cas évalué. En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.
- Fissuration par fatigue des couches stabilisées : Très faible augmentation pour les sols de fondation S2 (inférieure à 1%) et légère diminution pour les sols de fondation S3 et S4 (inférieure à 2%). En valeurs absolues la fissuration reste très faible et non critique.

### **Analyse de risque et facteur de risque associé**

La mesure d'adaptation "Adaptation de la superstructure" permet de diminuer de manière considérable le risque de la totalité des situations de risque évaluées. Le tableau ci-après montre les catégories de risque déterminées pour les différentes situations de risque avec et sans mesure d'adaptation (Tab. 7.17).

Pour les deux régions la diminution du risque est considérable. En effet, grâce à la mise en place de cette mesure le risque lié au changement climatique peut être ramené à un niveau très faible quelque soit la situation de risque évaluée.

La mesure d'adaptation permet d'augmenter la durée de vie moyenne des 30 situations de risque évaluées à 38.5 ans (sans mesure : 14.4 ans). Pour certains cas, des durées de vie très élevées sont prévues, montrant que la mesure d'adaptation est trop conséquente pour ceux-ci (région climatique "intermédiaire" ou région climatique "chaude" avec un trafic T5). Le nombre de cas présentant une durée de vie inférieure à 20 ans est nul (sans mesure : 83.3%).

| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
|---|--------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | Non évalué  |             |            | Non évalué  |             |            |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |        |             |             |            |             |             |            |             |             |            |
| Mesure  | Trafic | Sol S2      |             |            | Sol S3      |             |            | Sol S4      |             |            |
| Sans  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| Avec  | T5     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |
|   | T6     | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme | court-terme | moyen-terme | long-terme |

Légende : ct... court-terme ; mt... moyen-terme ; lt... long-terme

|          |             |        |       |       |            |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| Risque : | Très faible | Faible | Moyen | Elevé | Très élevé |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|

Tab. 7.17 – Mesure 9 – Résultats principaux de l'analyse de risque des structures routières suisses.

Le facteur de risque associé à la mesure d'adaptation "Adaptation de la superstructure" est le suivant :

$$f_{CC,global,mesure\ 9} = 0.00 \quad \text{et} \quad \Delta f_{CC,mesure\ 9} = -1.70$$

Ce facteur correspond à une catégorie de risque très faible ( $f_{CC} = 0.0$ ). La diminution du risque grâce à la mesure d'adaptation est très marquée ( $\Delta f_{CC,mesure\ 9} = -1.70$ ).

### Commentaires et conclusions

La mesure d'adaptation "Adaptation de la superstructure" présente un changement considérable du risque par rapport au cas sans mesure d'adaptation. Le risque passe dans la catégorie très faible pour toutes les situations de risque. Pour certaines situations cette mesure correspond à une variante très intéressante, principalement pour la région climatique "chaude" avec un trafic très élevé (T6). Pour les autres situations de risque, cette mesure semble être trop conséquente.

La mesure présente une résistance remarquable par rapport au phénomène de changement climatique. En effet, les changements des conditions météorologiques prévus présentent un impact négligeable sur les durées de vie des chaussées suisses.

La mesure peut être mise en place assez facilement pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure routière, mais se trouve être très onéreuse. Il est donc recommandé de recourir à cette mesure uniquement pour les cas les plus critiques (région climatique "chaude" avec trafic T6).

#### 7.4.4. Recommandations

Plusieurs mesures d'adaptation ont été mises au point et évaluées dans le cadre de cette thèse. Ces mesures s'intéressent au changement des paramètres structurels des chaussées et au changement des paramètres des matériaux. Il s'agit d'une liste non exhaustive de mesures permettant de lutter contre l'impact du changement climatique sur les infrastructures routières. D'autres mesures n'ont pas été prises en considérations, telles que des mesures opérationnelles (diminution des vitesses, limitation d'accès aux poids lourds lors de températures élevées, etc.).

Un tableau récapitulatif des différentes mesures d'adaptations évaluées peut être consulté ci-après (Tab. 7.18). Ce tableau reprend la définition des différentes mesures et leur impact sur la durée de vie moyenne des chaussées et l'analyse de risque.

| n° | Mesure   |                       | Durée de vie moyenne |  | Facteur de risque      |                        |
|----|--|-----------------------|----------------------|--|------------------------|------------------------|
|    | Description  | Variantes             | Moyenne [ans]        | Changement par rapport à référence [%] | $f_{CC,global,mesure}$ | $\Delta f_{CC,mesure}$ |
| 0  | Référence – Sans mesure                                    | -                     | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | -                      |
| 1  | Changement du type de superstructure                       | -                     | 17.9                 | 24.3%                                  | 1.10                   | -0.60                  |
| 2  | Adaptation de la portance du sol de fondation              | -                     | 17.4                 | 21.0%                                  | 1.38                   | -0.32                  |
| 3  | Adaptation des épaisseurs des couches de grave             | a) +50mm              | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | 0.00                   |
|    |  | b) +100mm             | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | 0.00                   |
| 4  | Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées          | a) +20mm              | 14.5                 | 0.7%                                   | 1.65                   | -0.05                  |
|    |  | b) +40mm              | 14.6                 | 1.5%                                   | 1.63                   | -0.07                  |
| 5  | Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en AC F | a) +20mm              | 15.7                 | 8.7%                                   | 1.55                   | -0.15                  |
|    |  | b) +40mm              | 17.3                 | 19.9%                                  | 1.42                   | -0.28                  |
| 6  | Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses         | a) +20mm              | 16.9                 | 17.4%                                  | 1.33                   | -0.37                  |
|    |  | b) +40mm              | 20.1                 | 39.6%                                  | 0.98                   | -0.72                  |
|    |  | c) -20mm              | 12.9                 | -10.4%                                 | 1.85                   | +0.15                  |
| 7  | Adaptation du grade des liants des couches de surface      | -                     | 15.1                 | 5.1%                                   | 1.57                   | -0.13                  |
| 8  | Adaptation du type de liant : Utilisation d'un PmB         | a) AC                 | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | 0.00                   |
|    |  | b) AC & AC B          | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | 0.00                   |
|    |  | c) AC (& AC B) & AC T | 14.4                 | 0.0%                                   | 1.70                   | 0.00                   |
| 9  | Adaptation de la superstructure : AC EME & AC MR           | -                     | 38.5                 | 167.4%                                 | 0.00                   | -1.70                  |

Tab. 7.18 – Mesures d'adaptation – Tableau récapitulatif.

L'évaluation de l'impact de ces mesures d'adaptation sur l'analyse de risque des chaussées permet de formuler des recommandations par rapport aux mesures à conseiller pour différentes situations spécifiques. Ces recommandations sont présentées dans le tableau ci-après (Tab. 7.19) et reprennent la totalité des situations analysées tout au long de cette thèse (classes de trafic T3 à T6, sols de fondations de classe S2 à S4, trois grandes régions climatiques, etc.). Les recommandations sont par la suite détaillées pour les trois grandes régions climatiques (Chapitres 7.4.4.1 à 7.4.4.3).

| Région "froide" : Jura, Alpes (haute altitude)                      |                      |                      |            |                      |                      |                      |             |             |            |
|---|----------------------|----------------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|------------|
| Trafic  | Sol S2               |                      |            | Sol S3               |                      |                      | Sol S4      |             |            |
|   | court-terme          | moyen-terme          | long-terme | court-terme          | moyen-terme          | long-terme           | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T3  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T4  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T5  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T6  | -                    | 1                    | 1          | -                    | -                    | 1                    | -           | -           | 1          |
| Région "intermédiaire" : Plateau, Préalpes, Alpes (altitude faible) |                      |                      |            |                      |                      |                      |             |             |            |
| Trafic  | Sol S2               |                      |            | Sol S3               |                      |                      | Sol S4      |             |            |
|   | court-terme          | moyen-terme          | long-terme | court-terme          | moyen-terme          | long-terme           | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T3  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T4  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T5  | -                    | 1                    | 1          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T6  | 1                    | 1                    | 1 & 5      | 1                    | 1                    | 1                    | 1           | 1           | 1          |
| Région "chaude" : Bassin Lémanique, Sud des Alpes                   |                      |                      |            |                      |                      |                      |             |             |            |
| Trafic  | Sol S2               |                      |            | Sol S3               |                      |                      | Sol S4      |             |            |
|   | court-terme          | moyen-terme          | long-terme | court-terme          | moyen-terme          | long-terme           | court-terme | moyen-terme | long-terme |
| T3  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T4  | -                    | -                    | -          | -                    | -                    | -                    | -           | -           | -          |
| T5  | 1 & 5<br>ou<br>1 & 6 | 1 & 5<br>ou<br>1 & 6 | 9          | 1 & 5<br>ou<br>1 & 6 | 1 & 5<br>ou<br>1 & 6 | 1 & 5<br>ou<br>1 & 6 | 1           | 1           | 1 & 7      |
| T6  | 9                    | 9                    | 9          | 9                    | 9                    | 9                    | 9           | 9           | 9          |

Tab. 7.19 – Mesures d'adaptation – Recommandations générales.

Dans la plupart des situations de risque, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être mises en place pour diminuer le risque lié à l'impact du changement climatique sur les chaussées. Dans ces cas un choix par rapport aux mesures les moins onéreuses et les plus faciles à mettre en place a été fait.

#### 7.4.4.1. Région climatique "froide"

Les évaluations effectuées dans le cadre de la thèse ont montrées qu'aucune adaptation conséquente du dimensionnement des chaussées n'est nécessaire pour cette région. Pour un trafic de classe T3 à T5, même à long-terme et avec le scénario climatique extrême (scénario A2), les infrastructures routières suisses permettent de résister au changement climatique et de son impact sur les performances des chaussées. Pour ces régimes de trafic, tout type de superstructure peut être choisi et toutes les situations présentent un risque très faible par rapport au changement climatique.

Pour un trafic très élevé (classe T6), tout type de superstructure peut être choisi à court-terme. A moyen-terme, les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) sont à éviter pour des infrastructures sur des sols de fondation avec une portance moyenne (S2). A long-terme, les superstructures de type 5 sont à éviter quelque soit la portance du sol de fondation et les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) sont à éviter pour des infrastructures sur

des sols avec une portance moyenne (S2). Les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F sur grave) permettent de résister au changement climatique quelque soit la situation évaluée.

Ainsi, le recours à la mesure d'adaptation 1 "Changement du type de superstructure" est suffisant pour permettre une durée de vie adéquate des chaussées en Suisse.

Dans la région climatique "froide" la question pourrait se poser de savoir si les chaussées standards ne sont pas surdimensionnées. Si un surdimensionnement était observé, il faudrait néanmoins porter une attention toute particulière au dimensionnement au gel de ces infrastructures. Cette question n'a pas été abordée dans le cadre de la thèse, mais pourrait faire partie d'une recherche ultérieure.

#### 7.4.4.2. Région climatique "intermédiaire"

Les évaluations effectuées dans le cadre de la thèse ont montrées que des mesures d'adaptation du dimensionnement des chaussées sont nécessaires pour plusieurs cas dans cette région, principalement pour un trafic très élevé. Pour un trafic de classe T3 à T4, même à long-terme et avec le scénario climatique extrême (scénario A2), les infrastructures routières standards suisses permettent de résister au changement climatique et de son impact sur les performances des chaussées. Pour ces régimes de trafic, tout type de superstructure peut être choisi et toutes les situations présentent un risque très faible par rapport au changement climatique.

Pour un trafic élevé (classe T5), tout type de superstructure peut être choisi à court-terme de même qu'à moyen et long-terme pour les sols de fondation de classe S3 ou S4. Pour les sols de fondation avec une portance moyenne (S2) les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) sont à éviter à moyen et à long-terme. Les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F sur grave) permettent d'atteindre des durées de vie très proches de 20 ans quelque soit la situation évaluée. Ainsi, le recours à la mesure d'adaptation 1 "Changement du type de superstructure" est suffisant pour permettre une durée de vie adéquate pour un trafic élevé.

Pour un trafic très élevé (classe T6), le recours à la mesure d'adaptation 1 "Changement du type de superstructure" est suffisant pour permettre une durée de vie adéquate des chaussées en Suisse pour la plupart des situations évaluées. Pour les sols de fondation de classe S2 ou S3, les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) et 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) sont à éviter quelque soit la période d'analyse. Pour les sols de fondation de classe S4, les superstructures de type 5 sont à éviter quelque soit la période d'analyse et les superstructures de type 1 sont à éviter à moyen et long-terme. Les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F sur grave) permettent d'atteindre des durées de vie très proches de 20 ans quelque soit la situation évaluée. A long-terme, les superstructures de type 2 peuvent néanmoins présenter un risque "moyen" pour les sols de fondation à portance moyenne (S2), nécessitant le recours à des mesures d'adaptations plus conséquentes. Dans cette situation, il est recommandé d'augmenter les épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F de 20 mm (mesure 5).

La mesure d'adaptation 9 "Adaptation de la superstructure" peut également être envisagée pour les situations à risque dans cette région climatique. Le recours à cette mesure permettrait de garder le risque à un niveau faible. En effet, la mesure 9 permet d'atteindre des durées de vie confortables, alors que les autres mesures recommandées présentent des durées de vie proches de 20 ans.

Dans la région climatique "intermédiaire" la question pourrait se poser de savoir si les chaussées standards ne sont pas surdimensionnées pour un trafic faible à moyen (T3 et T4). Cette question n'a pas été abordée dans le cadre de la thèse, mais pourrait faire partie d'une recherche ultérieure.

#### 7.4.4.3. Région climatique "chaude"

Les évaluations effectuées dans le cadre de la thèse ont montrées que des mesures d'adaptation conséquentes du dimensionnement des chaussées sont nécessaires pour les régimes à trafic élevé et très élevé. Pour un trafic de classe T3 à T4, même à long-terme et avec le scénario climatique extrême (scénario A2), les infrastructures routières standards suisses permettent de résister au changement climatique et de son impact sur les performances des chaussées. Pour ces régimes de trafic, tout type de superstructure peut être choisi et toutes les situations présentent un risque très faible par rapport au changement climatique.

Pour un trafic élevé (classe T5), le recours à différentes mesures d'adaptation est recommandé selon les situations :

- Sol de fondation avec portance très élevée (S4) : Le recours à la mesure 1 "Changement du type de superstructure" est suffisant pour permettre une durée de vie adéquate des chaussées en Suisse à court et moyen-terme. Les superstructures de type 5 (avec couche stabilisée aux liants hydrauliques) sont à éviter pour les deux périodes et les superstructures de type 2 (avec couche de fondation en enrobé bitumineux AC F sur grave) sont à éviter pour le long-terme. Les superstructures de type 1 (enrobé bitumineux sur grave) permettent d'atteindre des durées de vie supérieures à 20 ans quelque soit la situation évaluée.

A long-terme, il est recommandé de recourir pour cette situation à une superstructure de type 1 avec adaptation du grade des liants composant les couches de surface (mesure 7). Il convient de choisir un liant de grade plus dur pour permettre d'atteindre des durées de vie très proches de 20 ans.

- Sol de fondation avec portance élevée (S3) : A court et à moyen-terme, il est recommandé de recourir soit à la mesure 5 "Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F", soit à la mesure 6 "Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses". Le premier cas consiste à recourir à une superstructure de type 2 avec une augmentation de 20 mm de l'épaisseur de la couche de fondation en AC F. Le deuxième cas consiste à recourir à une superstructure de type 2 avec une augmentation de 20 mm de l'épaisseur de la couche de base AC T.

A long-terme, les mêmes mesures peuvent être prises, mais cette fois-ci avec une augmentation de 40 mm de l'épaisseur de la couche de fondation ou de la couche de base.

- Sol de fondation avec portance moyenne (S2) : A court et à moyen-terme, il est recommandé de recourir soit à la mesure 5, soit à la mesure 6 comme pour le sol de fondation avec une portance élevée. Dans les deux cas une augmentation de 40 mm de l'épaisseur de la couche de fondation ou de la couche de base est recommandée.

A long-terme, il est recommandé de recourir à la mesure 9 "Adaptation de la superstructure" en mettant en place des revêtements à haute performance. Les trois différents types de superstructures peuvent être choisis.

Pour un trafic très élevé (classe T6), le recours à la mesure 9 "Adaptation de la superstructure" est recommandé quelque soit la portance du sol de fondation ou la période d'analyse évaluée. La mise en place de revêtements à haute performance est nécessaire pour ce régime de trafic. Les trois différents types de superstructures peuvent être choisis.

## 8. CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

La thèse a permis d'apporter des explications à plusieurs questions que l'on se pose depuis peu dans le domaine des infrastructures routières. Tout d'abord l'impact du changement climatique a pu être démontré et quantifié de manière scientifique, puis des recommandations pour mieux résister à ce phénomène ont pu être données. La recherche indique des tendances futures par rapport au comportement des chaussées et leur interaction avec l'environnement.

La thèse montre que l'impact du changement climatique peut être conséquent. Certains cas (trafic élevé, régions à températures élevées, etc.) nécessitent la mise en place de mesures d'adaptation déjà à court-terme (2020). Les mesures proposées dans cette recherche, recourant à des technologies et techniques existantes et reconnues, devraient néanmoins être suffisantes pour lutter efficacement contre ce phénomène.

Plusieurs conclusions ont pu être tirées de cette recherche et plusieurs recommandations ont pu être formulées. Celles-ci sont exposées dans le chapitre suivant (Chapitre 8.1). Finalement, des propositions pour des recherches ultérieures ont également pu être énoncées (Chapitre 8.2).

### 8.1. Conclusions générales et recommandations

La thèse a permis de formuler les conclusions générales et les recommandations suivantes, réparties selon les différents domaines abordés.

#### *Prévision des conditions météorologiques "routières" en Suisse*

La prévision des conditions météorologiques, effectuée à l'aide du modèle climatique de pronostic Meteonorm 7.0, a permis de formuler les conclusions suivantes :

- Régimes de températures : Au cours du 21<sup>ème</sup> siècle toutes les régions climatiques de la Suisse vont être sujettes à un changement de leurs régimes de températures. Ce changement est déjà actuellement en cours et va s'intensifier tout au long de ce siècle. L'intensité du changement est clairement dépendante du scénario d'émission pris en considération, donc de l'évolution démographique, sociale, économique et technologique de l'humanité.

Ce changement va se manifester par un décalage et un étalement des courbes de répartition des températures. Ceci impliquera non seulement une augmentation des températures moyennes mais également une apparition plus fréquente des températures extrêmes (hautes et basses). Le changement des températures va toucher toutes les régions climatiques, mais peut présenter des différences régionales non négligeables. Le changement des régimes de températures va également avoir un impact direct sur l'apparition de périodes chaudes et froides. En effet les journées et périodes chaudes devraient clairement augmenter au fil du 21<sup>ème</sup> siècle, alors que les journées et périodes froides devraient diminuer.

Les années avec des conditions extrêmes vont avoir un impact considérable sur les températures maximales. Ainsi des températures estivales autour de 40°C sont prévues pour plusieurs sites géographiques situés plutôt au sud de la Suisse (Bassin lémanique, Valais, Grisons et Tessin).

- Cycles de gel-dégel : Un changement important des cycles de gel-dégel devrait également se manifester. Ce changement aura comme conséquences une diminution du nombre de cycles et une diminution de la longueur des périodes de gel et de dégel.
- Autres conditions météorologiques : Les régimes de précipitations devraient également être sujets à des changements au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour toutes les régions climatiques de la Suisse. Ces changements seront par contre moins marqués que les changements prévus des régimes de températures. Pour les régimes de précipitations, l'intensité des changements est très peut dépendante du scénario d'émission pris en considération. De manière générale, une diminution des précipitations moyennes et maximales annuelles est prévue, ainsi qu'une diminution des précipitations moyennes et maximales entre le printemps et l'automne. Par contre une légère augmentation des précipitations moyennes et maximales hivernales est prévue.

Les autres conditions météorologiques (vent, humidité, ensoleillement) ne devraient montrer aucun changement important de leurs intensités au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, et ceci pour toutes les régions climatiques de la Suisse et les trois scénarios climatiques évalués.

Rappelons qu'en ce qui concerne les prévisions climatiques, les hypothèses courantes selon le rapport de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [59] ont été utilisées et appliquées. Ces hypothèses doivent être prises avec précaution car elles sont basées sur des considérations futures difficiles à prévoir.

### ***Impact du changement climatique sur l'état structurel et fonctionnel des chaussées***

La prévision de l'impact du changement climatique sur l'état structurel et fonctionnel des chaussées, effectuée à l'aide de différentes méthodes de dimensionnement et à l'aide du modèle climatique de pronostic Meteororm 7.0, a permis de formuler les conclusions suivantes :

- Dimensionnement au gel des chaussées en Suisse : L'impact du changement climatique sur le dimensionnement au gel a été évalué à l'aide de la méthode de dimensionnement suisse SN 640 324b [114]. De manière générale, une forte baisse des indices de gel de l'air et donc une diminution des profondeurs de pénétration du gel ont pu être évaluées pour toute la Suisse.

A moyen ou long-terme, la plupart des régions climatiques en Suisse ne nécessiteront plus d'adaptation des épaisseurs des chaussées pour résister au gel. Néanmoins les régions montagneuses (Jura et Valais) seront toujours touché par ce phénomène, mais d'une manière moins marquée qu'actuellement. La recherche a permis d'adapter les catégories de l'indice de gel significatif de l'air et d'introduire une évolution temporelle de ces catégories.

Le phénomène de changement climatique est donc de ce côté bénéfique pour le dimensionnement des chaussées, car il suffira déjà dans un futur proche de mettre en place des surépaisseurs beaucoup plus faibles qu'actuellement. Ceci aura un impact positif entre autre sur les coûts et la durée des travaux de réalisation.

- Orniérage des chaussées en Suisse : L'impact du changement climatique sur l'orniérage des chaussées en Suisse a été évalué à l'aide de différents modèles de comportement des revêtements. De manière générale, tous les modèles prévoient une augmentation de l'orniérage en raison du phénomène de changement climatique. La distinction entre les différents modèles est difficile, en effet chaque modèle est basé sur des considérations théoriques et des paramètres différents.
- Performances des chaussées suisses et durées de vie correspondantes : L'impact du changement climatique sur les performances des chaussées a été évalué par la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique américaine, à l'aide de l'outil de dimensionnement DARWin-ME. L'utilisation de cet outil a permis d'intégrer une multitude de paramètres et de coupler la méthode avec le modèle climatique de pronostic.



L'impact du changement climatique sur les performances des chaussées se présente entre autre par une augmentation des profondeurs d'ornières, performance critique des chaussées suisses. Cette augmentation sera d'autant plus élevée que le trafic est élevé et que les températures de la région sont élevées. La même constatation peut être faite par rapport à la fissuration par fatigue du haut vers le bas, performance critique pour certains cas, mais présentant des dégradations plus faibles que l'orniérage.

Les autres performances peuvent aussi être dépendantes du phénomène de changement climatique. Ainsi la fissuration par fatigue du bas vers le haut montre également une augmentation de l'étendue de la fissuration, mais celle-ci reste très faible par rapport aux valeurs limites prescrites selon les normes suisses. La fissuration par fatigue des couches stabilisées ne montre elle qu'un impact très faible en raison du changement climatique.

- Analyse de risque et définition d'un facteur de risque : Une analyse de risque, effectuée afin de mieux juger de l'impact possible du changement climatique sur les chaussées, a permis d'observer une augmentation générale du risque, liée à une diminution des durées de vie des chaussées.

La région climatique correspond au facteur déterminant pour l'évaluation de l'impact du changement climatique. Il existe trois grandes régions climatiques pour les chaussées standards suisses : Une région "chaude" caractérisée par des températures de l'air élevées, une région "intermédiaire" caractérisée par des températures moyennes et une région "froide" caractérisée par des températures faibles. Ces régions présentent des différences importantes par rapport à leur comportement vis-à-vis des conditions météorologiques.

Les différences entre les trois scénarios climatiques peuvent être importantes, et celles-ci augmentent dans le temps. Par rapport aux performances critiques les différences entre la période de référence et le court-terme restent faibles.

Pour chaque catégorie de risque un facteur de risque des chaussées lié au changement climatique a été défini. Ce facteur a permis de définir l'étendue des mesures d'adaptation à appliquer, dans le but de diminuer le risque à un niveau acceptable.

### ***Mesures d'adaptation – Recommandations pratiques***

La mise au point de plusieurs mesures d'adaptation et leur évaluation, effectuée à l'aide de la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique, a permis de formuler les conclusions et recommandations suivantes :

- Mesures d'adaptation pour la région "froide" : Les évaluations effectuées ont montrées qu'aucune adaptation conséquente du dimensionnement des chaussées n'est nécessaire. Uniquement pour un trafic très élevé (classe T6), certains types de superstructure sont à recommander à moyen et à long-terme.
- Mesures d'adaptation pour la région "intermédiaire" : Les évaluations effectuées ont montrées que des mesures d'adaptation du dimensionnement des chaussées sont nécessaires pour plusieurs cas, principalement pour un trafic très élevé (classe T6). Pour ce régime de trafic, certains types de superstructure sont à recommander déjà à court-terme. A long-terme, des mesures plus conséquentes peuvent être recommandées pour certains cas.
- Mesures d'adaptation pour la région "chaude" : Les évaluations effectuées ont montrées que des mesures d'adaptation conséquentes du dimensionnement des chaussées sont nécessaires pour les régimes à trafic élevé (classe T5) et très élevé (classe T6) et ceci déjà à court-terme. Pour un trafic élevé, différentes mesures d'adaptation peuvent être recommandées selon le cas évalué (choix du type de superstructure, choix du type de liant, adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses, utilisation de revêtements à haute performances, etc.). Pour un trafic très élevé (classe T6), le recours à des revêtements à haute performances est recommandé quelque soit le cas évalué.

- Normalisation et guides techniques : Le phénomène de changement climatique devrait être inclus dans la planification de nouvelles infrastructures ou de travaux de maintenance des réseaux actuels. La normalisation devrait intégrer une distinction plus marquée entre le dimensionnement des structures routières selon les trois régions climatiques et selon l’horizon de mise en œuvre. Les mesures d’adaptation décrites dans cette thèse permettraient d’augmenter la résistance des chaussées sans procéder à des changements radicaux des pratiques employées actuellement dans ce domaine.

La thèse montre que l’impact du changement climatique peut être conséquent et donne des tendances nettes vis-à-vis du comportement des infrastructures routières suisses. Certains cas (trafic élevé, régions à températures élevées, etc.) nécessitent la mise en place de mesures d’adaptation déjà à court-terme (2020). Les mesures proposées, recourant à des technologies et techniques existantes et reconnues, sont néanmoins suffisantes pour lutter efficacement contre ce phénomène.

Il faut noter que les infrastructures routières sont dimensionnées par rapport à des durées de vie à court ou à moyen-terme, alors que le changement climatique se développe plutôt sur le moyen ou le long-terme. Ceci montre que les mesures d’adaptation dans le domaine pourront être exécutées de manière continue lorsque par exemple des travaux de réparation ou de remplacement sont prévus sur une route. Le recours à des mesures d’urgences n’est pas nécessaire.

## **8.2. Propositions pour des recherches ultérieures**

Plusieurs propositions pour des domaines de recherches ultérieures peuvent être faites :

- Evaluation économique : Une évaluation économique détaillée pourrait être effectuée afin de déterminer l’impact économique du recours aux diverses mesures d’adaptation pour lutter contre le phénomène de changement climatique.
- Revêtements en béton : Le recours à des revêtements en béton, pratique peu employée en Suisse, pourrait avoir un impact positif sur la durée de vie des chaussées à long-terme. En effet, ces types de revêtements devraient présenter une moins grande susceptibilité aux changements des conditions météorologiques si les phénomènes de retrait sont maîtrisés.
- Performances non considérées : Le changement climatique pourrait aussi avoir des impacts sur d’autres performances des revêtements qui ne sont pas prises en compte dans la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique (p.ex. ressuage, arrachements, etc.).
- Surdimensionnement des chaussées : Les évaluations effectuées ont montrées que plusieurs cas, principalement à trafic faible et dans la région climatique "froide", présentent des durées de vie élevées. Dans ces cas, la question du surdimensionnement des chaussées se pose.
- Autres : Il existe une multitude d’autres paramètres qui pourraient être inclus dans une recherche plus large, tels que l’effet de matériaux de recyclage dans les revêtements ou l’utilisation d’autres méthodes de dimensionnement.

Il convient de se rendre compte que sur le long terme (d’ici 2100), d’autres changements (nouveaux matériaux, changement des charges de trafic, etc.) pourraient avoir des impacts très importants. Les impacts de ces changements pourraient même être plus importants que les impacts dus au changement climatique.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

### 9.1. Bibliographie "route"

- [1] AASHTO (2008) *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. Interim Report.
- [2] Andrey J., Knapper C. (2003) *Weather and Transportation in Canada*. Rapport du Département de Géographie de l'université de Waterloo.
- [3] Angst C., Remund J. *Klimatische Grundlagen der Schweiz für die SHRP-Bitumenklassifikation*. Rapport OFROU, n°473.
- [4] Austroads (2004) *Impact of Climate Change on Road Infrastructure*. Rapport Austroads, n°AP-R243/04.
- [5] Banque Mondiale (1998) HDM-4 : Highway Design and Maintenance Standards Models, Rapport de la Banque Mondiale.
- [6] Danish Academy for the Technical Sciences (2003) *Effects of Climate Change – Adaptations in Denmark*. Report from the Danish Academy for Technical Sciences.
- [7] Department for Transport, United Kingdom (2004) *The changing climate: its impact on the Department for Transport*. Report from the Department for Transport, United Kingdom.
- [8] Di Benedetto H., Corté J.-F. (2004) *Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés thermo-mécaniques des mélanges*. Hermes Science Publications - Lavoisier, Paris.
- [9] Dumont A.-G., Turtschy J.C., Pucci T., Fontana M., Scazziga I. (2001) *Analyse des modèles de comportement des chaussées*. Rapport OFROU, n°1002.
- [10] Dumont A.-G., Perret J. (2006) *Dimensionnement des infrastructures de transport*. Document de cours destiné aux étudiants de l'EPFL, Lausanne.
- [11] Dumont A.-G. (2006) *Réalisation des infrastructures de transport*. Document de cours destiné aux étudiants de l'EPFL, Lausanne.
- [12] Dumont A.-G., Tille M. (2008) *Gestion de la maintenance des infrastructures de transport*. Document de cours destiné aux étudiants de l'EPFL, Lausanne.
- [13] European Commission (1998) *PARIS – Performance Analysis of Road Infrastructure*. Rapport du Transport RTD Programme of the 4<sup>th</sup> Framework Programme.
- [14] European Commission (2010) *IRWIN - Improved local winter index to assess maintenance needs and adaption costs in climate change scenarios*. Report from the 6th Framework Programme of the European Commission.
- [15] European Commission (2010) *P2R2C2 - Pavement Performance and Remediation Requirements following Climate Change*. Report from the 6th Framework Programme of the European Commission.
- [16] European Commission (2010) *RIMAROCC - Risk Management for Roads in a Changing Climate*. Report from the 6th Framework Programme of the European Commission.

- 
- [17] European Commission (2010) *SWAMP - Storm water prevention - Methods to predict damage from the water stream in and near road pavement in lowland areas*. Report from the 6th Framework Programme of the European Commission.
- [18] European Cooperation in Science and Technology (1997) *COST 324 – Long Term Performance of Road Pavements*. Rapport COST.
- [19] Francken L. (1977) *Permanent Deformation Law of Bituminous Road Mixes in Repeated Triaxial Compression*. 4<sup>th</sup> International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements 1977, Ann Arbor.
- [20] Gouvernement du Canada (2008) *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007*. Rapport M174-2/1-2007 du Gouvernement du Canada.
- [21] Heller S. (2010) *Provision of road and building data for the analysis of the impact of climate change*. Road Owners Getting to Grips with Climate Change – Final Conference 2010, Köln.
- [22] Kinsella Y., McGuire F. (2005) *Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target*. Transit New Zealand, Conference Article.
- [23] Kumerics C., *Risk assessment of landslides by the increase of extreme weather events*. Road Owners Getting to Grips with Climate Change – Final Conference 2010, Köln.
- [24] Lind B., Falemo S., Ray M., Fadeuilhe J.-J., Bles T., Mens M., Sandersen F. (2010) *Risk Management for Roads in a Changing Climate*. Transport Research Arena (TRA) 2010, Bruxelles.
- [25] NCHRP (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design – M-E PDG*. NCHRP Report 1-37A.
- [26] Ould-Henia M., Rodriguez M., Dumont A.G. (2004) *Élaboration d'une méthode prédictive de l'ornièrage des revêtements bitumineux*. Rapport OFROU, n°1081.
- [27] Parriaux A. (2007) *Routes et changement climatique en montagne : un problème chaud à résoudre la tête froide*. Congrès Mondial de l'AIPCR 2007, Paris.
- [28] Petkovic G., Humstad T., Bjordal H., Larsen J.O., Aursand P.O. (2010) *“Climate and Transport” – R&D Programme for Adaptation of Norwegian Roads to Climate Change*. Transport Research Arena (TRA) 2010, Bruxelles.
- [29] Phillips S. (2010) *Towards the Forever Open Road*. TRB 2010, Washington.
- [30] Ray M., Ennesser Y. (2010) *Adapting Infrastructure to Climate Change: Approach and Tool Kit*. Transport Research Arena (TRA) 2010, Bruxelles.
- [31] Schmidt H., *Determining the risk of aquaplaning on federal highways taking into account climate change and the associated precipitation events*. Road Owners Getting to Grips with Climate Change – Final Conference 2010, Köln.
- [32] Swedish Commission on Climate and Vulnerability (2007) *Sweden facing climate change – threats and opportunities*. Swedish Government Official Reports SOU 2007:60.
- [33] Transportation Research Board (2008) *Potential impacts of climate change on U.S. transportation*. Transportation Research Board – Special Report 290.
- [34] Warren F.J., Barrow E., Schwartz R., Andrey J., Mills B., Riedel D. (2004) *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Rapport de la Direction des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques - Ressources naturelles Canada.
-

[35] Zuffrey J.D., Monsch D., Scazziga I. (1990) *Entwicklung von Verhaltensmodellen als Grundlage eines programmierten Erhaltungskonzeptes - Teil 1: Modelle für bleibende Verformungen*. Rapport OFROU, n°196.

## 9.2. Bibliographie "changement climatique"

[36] Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. (2006) *Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*. Journal of Geophysical Research, vol.111, D05109.

[37] Bader S. (2004) *Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003*. Bericht MeteoSchweiz, n°200.

[38] Bader S., Bantle H. (2004) *Das Schweizer Klima im Trend - Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001*. Bericht MeteoSchweiz, n°68.

[39] Begert M., Seiz G., Schlegel T., Musa M., Baudraz G., Moesch M. (2003) *Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961-1990*. Bericht Meteo-Schweiz, n°67.

[40] Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. (2005) *Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000*. International Journal of Climatology, vol.25, pp.65-80.

[41] Beniston M., Rebetez M., Giorgi F., Marinucci M. R. (1994) *An Analysis of Regional Climate Change in Switzerland*. Theoretical and Applied Climatology, vol.49, pp.135-159.

[42] Beniston M., Rebetez M. (1996) *Regional Behavior of Minimum Temperatures in Switzerland for the Period 1979-1993*. Theoretical and Applied Climatology, vol.53, pp.231-243.

[43] Beniston M., Diaz H.F., Bradley R.S. (1997) *Climatic change at high elevation sites: An overview*. Climatic Change, vol.36, pp.233-251.

[44] Beniston M. (1997) *Variations of snowdepth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: Links to changes in large-scale climatic forcings*. Climatic Change, vol.36, pp.281-300.

[45] Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K. (2007) *Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections*. Climatic Change, vol.81, pp.71-95.

[46] Brown S.J., Caesar J., Ferro C.A.T. (2008) *Global changes in extreme daily temperature since 1950*. Journal of Geophysical Research, vol.113, D05115.

[47] Casty C., Wanner H., Luterbacher J., Esper J., Böhm R. (2005) *Temperature and Precipitation Variability in the European Alps since 1500*. International Journal of Climatology, vol.25, pp.1855-1880.

[48] Ceppi P., Della-Marta P.M., Appenzeller C. (2008) *Extreme Value Analysis of Wind Speed Observations over Switzerland*. Bericht Meteo-Schweiz, n°219.

[49] Commission of the European Communities. (2007) *Adapting to climate change in Europe – options for EU action*. Green Paper, COM(2007) 354 final.

[50] Courvoisier H.W. (1998) *Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge in der Schweiz 1901-1996*. Bericht Meteo-Schweiz, n°194.

- [51] Earth System Research Laboratory (ESRL) – Laboratory of the National Oceanic & Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce (2011) <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aqgi>.
- [52] Easterling D.R., Meehl G.A., Parmesan C., Changnon S.A., Karl T.R., Mearns L.O. (2000) *Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts*. Science, vol.289, pp.2068-2074.
- [53] European Topic Centre on Air and Climate Change - ETC/ACC (2010) *Climatic Tipping Elements with potential impact on Europe*. ETC/ACC Technical Paper, n°2010/3.
- [54] European Topic Centre on Air and Climate Change - ETC/ACC (2010) *Impacts of climate change on snow, ice, and permafrost in Europe: Observed trends, future projections, and socioeconomic relevance*. ETC/ACC Technical Paper, n°2010/13.
- [55] Frei C. (2004) *Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion*. Bericht MeteoSchweiz.
- [56] Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T. (2002) *Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century*. Climate Research, vol.19, pp.193-212.
- [57] Gay-Garcia C., Estrada F., Sánchez A. (2009) *Global and hemispheric temperatures revisited*. Climatic Change, vol.94, pp.333-349.
- [58] Heimann D., Sept V. (2000) *Climate Change Estimates of Summer Temperature and Precipitation in the Alpine Region*. Theoretical and Applied Climatology, vol.66, pp.1-12.
- [59] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007*. IPCC Fourth Assessment Report.
- [60] Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. (1999) *Surface Air Temperature and its Changes over the past 150 Years*. Reviews of Geophysics, vol.37, pp.173-199.
- [61] Jones P.D., Moberg A. (2003) *Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001*. Journal of Climate, vol.16, pp.206-223. 2003.
- [62] Jungo P., Beniston M. (2001) *Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes*. Theoretical and Applied Climatology, vol.69, pp.1-12.
- [63] Katz R.W., Brown B.G. (1992) *Extreme Events in a Changing Climate: Variability is more important than Averages*. Climatic Change, vol.21, pp.289-302.
- [64] Kharin V.V., Zwiers F.W., Zhang X., Hegerl G.C. (2007) *Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations*. Journal of Climate, vol.20, pp.1419-1444.
- [65] Klein Tank A.M.G., Können G.P. (2003) *Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99*. Journal of Climate, vol.16, pp.3665-3680.
- [66] Meehl G.A., Zwiers F., Evans J., Knutson T., Mearns L., Whetton P. (2000) *Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol.81, Issue 3, pp.427–436.
- [67] MétéoSuisse - Office fédéral de météorologie et de climatologie (2011) <http://www.meteosuisse.admin.ch>.
- [68] Meteotest (2012) *Meteonorm 7.0 – Handbook*.

- [69] National Climatic Data Center (2011) <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>.
- [70] OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques (2003) *Événements extrêmes et changements climatiques*. Rapport de l’OcCC.
- [71] OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques (2007) *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 - Impacts attendus sur l’environnement, la société et l’économie*. Rapport de l’OcCC.
- [72] OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques (2008) *Le climat change – que faire? – Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l’optique de la Suisse*. Rapport de l’OcCC.
- [73] OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques (2009) *Jahresbericht 2008*. Rapport annuel de l’OcCC.
- [74] Office fédéral de l’environnement – OFEV (2010) <http://www.bafu.admin.ch>.
- [75] Philipona R. (2012) *Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps*. International Journal of Climatology, vol.32.
- [76] ProClim - Forum for Climate and Global Change (2005) *Canicule de l’été 2003 - Rapport de synthèse*. Rapport ProClim.
- [77] ProClim - Forum for Climate and Global Change (2010) *Les arguments des climatosceptiques*. Informations au sujet de la recherche sur le climat et le changement global, n°29, novembre 2010.
- [78] Rebetez M. (2004) *Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps*. Climate Research, vol.27, pp.45-50.
- [79] Rebetez M., Reinhard M. (2008) *Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004*. Theoretical and Applied Climatology, vol.91, pp.27-34.
- [80] Robock A., Turco R.P., Harwell M.A., Ackerman T.P., Andressen R., Chang H.-S., Sivakumar M.V.K. (1993) *Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis*. Climatic Change, vol.23, pp.293-335.
- [81] Schaefer K., Zhang T., Bruhwiler L., Barrett A.P. (2011) *Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming*. Tellus, vol. 63B, pp.165-180.
- [82] Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. (2004) *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*. Nature, vol.427, pp.332-336.
- [83] Scherrer S.C., Appenzeller C., Laternser M. (2004) *Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability*. Geophysical Research Letters, vol.31, L13215.
- [84] Scherrer S.C., Appenzeller C., Liniger M.A. (2006) *Temperature Trends in Switzerland and Europe: Implications for Climate Normals*. International Journal of Climatology, vol.26, pp.565-580.
- [85] Tebaldi C., Hayhoe K., Arblaster J.M., Meehl G.A. (2006) *Going to the Extremes: An Intercomparison of Model-Simulated Historical and Future Changes in Extreme Events*. Climatic Change, vol.79, pp.185-211.
- [86] Wanner H. (2011) *Winter is cold comfort for climate scientist*. Interview sur swissinfo.ch, 24.01.2011.

- [87] World Meteorological Organization – WMO (2009) *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Rapport WMO-TD No. 1500.
- [88] Z'graggen L. (2006) *Die Maximaltemperaturen im Hitzesommer 2003 und Vergleich zu früheren Extremtemperaturen*. Bericht MeteoSchweiz, n°212.
- ### 9.3. Normes
- [89] CEN/TR 15352:2006 (2006) *Bitumes et liants bitumineux – Elaboration de spécifications reliées aux performances*. Norme européenne.
- [90] EN 1793 – 1794 & EN 14388 – 14389 (div.) *Dispositifs de réduction du bruit du trafic routier*. Normes européennes.
- [91] EN 12271:2006 (2003) *Enduits superficiels – Spécifications*. Norme européenne.
- [92] EN 12591:2009, EN 13304:2009, EN 13305:2009, EN 13808:2005, EN 13924:2006/AC:2006, EN 14023:2010 & EN 15322:2009 (div.) *Bitumes et liants bitumineux – Spécifications*. Normes européennes.
- [93] EN 12676-1 & 2 (2003/2000) *Ecrans anti-éblouissement routiers*. Normes européennes.
- [94] EN 12697-22:2003 (2003) *Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 22: Essai d'orniérage*. Norme européenne.
- [95] EN 13036-3 – 13036-7 & 13473-1 (div.) *Caractéristiques de surface des chaussées*. Normes européennes.
- [96] EN 13043:2002/AC:2004 (2004) *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels*. Norme européenne.
- [97] EN 13055-2:2004 (2004) *Granulats légers pour mélanges hydrocarbonés, enduits superficiels et pour utilisation en couches traitées et non traitées*. Norme européenne.
- [98] EN 13108-1:2006/AC:2008 (2008) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie: Enrobés bitumineux*. Norme européenne.
- [99] EN 13108-5:2006/AC:2008 (2008) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 5: Béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic*. Norme européenne.
- [100] EN 13108-20:2006/AC:2008 (2008) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 20: Epreuve de formulation*. Norme européenne.
- [101] EN 13242:2002/A1:2007 (2007) *Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités*. Norme européenne.
- [102] EN 13249:2000/A1:2005 – 13265:2000/A1:2005, EN 13361:2004/A1:2006, EN 13362:2005, EN 13491:2004/A1:2006 – 13493:2005, EN 15381:2008, EN 15382:2008, ISO/TR 20432:2007/C1:2008, ISO TS 13434:2008 (div.) *Géosynthétiques*. Normes européennes.
- [103] EN 13285:2003 (2003) *Graves non traitées – Spécifications*. Norme européenne.
- [104] EN 14227-1 – 14227-14 (div.) *Mélanges traités aux liants hydrauliques*. Normes européennes.
- [105] EN ISO 10318:2005 (2005) *Géosynthétiques – Termes et définitions*. Norme européenne.
- [106] EN ISO 11819-1 (2001) *Acoustique*. Norme européenne.
- [107] EN ISO 22476-2:2005 – 22476-12:2009 (div.) *Reconnaissance et essais géotechniques*. Normes européennes.
- [108] SN 640 006 – 640 010 (div.) *Capacité, niveau de service, charges compatibles*. Normes suisses.



- [109] SN 640 017 – 640 024 (div.) *Accidents de la circulation*. Normes suisses.
- [110] SN 640 026 – 640 032 (div.) *Elaboration des projets*. Normes suisses.
- [111] SN 640 080b (1991) *Projet, généralités – La vitesse, base de l'étude des projets*. Norme suisse.
- [112] SN 640 090b (2001) *Projets, bases – Distances de visibilité*. Norme suisse.
- [113] SN 640 120 (1995) *Tracé – Pentés transversales en alignement et dans les virages, variation du dévers*. Norme suisse.
- [114] SN 640 324b (2010) *Dimensionnement de la structure des chaussées – Sol de fondation et chaussée*. Norme suisse.
- [115] SN 640 330a (2003) *Déflexions – Généralités*. Norme suisse.
- [116] SN 640 340 – 640 366 (div.) *Evacuation des eaux de chaussée*. Normes suisses.
- [117] SN 640 415d-NA (2011) *Enduits superficiels – Spécifications*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 12217:2006.
- [118] SN 640 430b (2008) *Enrobés bitumineux compactés – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place*. Norme suisse.
- [119] SN 640 431-1b-NA (2008) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 1: Enrobés bitumineux*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 13108-1:2006/AC.
- [120] SN 640 431-5a-NA (2008) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 5: Béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 13108-5:2006/AC:2008.
- [121] SN 640 431-20b-NA (2010) *Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 20: Epreuve de formulation*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 13108-20:2006/AC:2008.
- [122] SN 640 440c (2009) *Asphalte coulé routier – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place*. Norme suisse.
- [123] SN 640 490 – 640 500 (div.) *Mélanges traitées aux liants hydrauliques*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN 14227-1 – 14227-14.
- [124] SN 640 510a – 640 521c (div.) *Caractéristiques de surface des chaussées*. Normes suisse – Annexes nationales aux normes EN 14227-1 – 14227-14.
- [125] SN 640 520a (1977) *Planéité – Contrôle de la géométrie*. Norme suisse.
- [126] SN 640 521c (2003) *Planéité – Exigences de qualité*. Norme suisse.
- [127] SN 640 530-1a (2009) *Acoustique*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN ISO 11819-1.
- [128] SN 640 558-1 & 2 (2005) *Ecrans anti-éblouissement routiers*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN 12767-1 & 2.
- [129] SN 640 570 – 640 578 (div.) *Protection contre le bruit*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN 1793 – 1794 & EN 14388 – 14389.
- [130] SN 640 730b – 640 767 (div.) *Entretien des chaussées*. Normes suisses.
- [131] SN 640 750b – 640 778a (div.) *Service hivernal*. Normes Suisse.
- [132] SN 640 781 & 640 800 – 640 807 (div.) *Gestion du trafic et des transports*. Normes suisses.
- [133] SN 640 845 – 640 847 & 640 870 – 640 875 (div.) *Signaux*. Normes suisses.
- [134] SN 640 850 – 640 854 & 640 877 (div.) *Marquages*. Normes suisses.
- [135] SN 640 925b (2003) *Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice*. Norme suisse.

- [136] SN 640 925b – Annexe (2003) *Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Mode opératoire pour le relevé visuel d'état avec le catalogue des dégradations*. Norme suisse.
- [137] SN 670 010b (1998) *Coefficients caractéristiques des sols*. Norme suisse.
- [138] SN 670 060 & SN 670 061b (div.). *Bitumes et liants bitumineux*. Normes suisses – Annexe nationale à la norme CEN/TR 15352:2006.
- [139] SN 670 090a & SN 670 092 (div.). *Géosynthétiques*. Normes suisses – Annexe nationale à la norme EN ISO 10318:2005.
- [140] SN 670 103b (2006) *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 13043:2002/AC:2004.
- [141] SN 670 107-2 (2006) *Granulats légers pour mélanges hydrocarbonés, enduits superficiels et pour utilisation en couches traitées et non traitées*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 13055-2:2004.
- [142] SN 670 119a-NA (2010) *Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités & Graves non traitées – Spécifications*. Norme suisse – Annexe nationale aux normes EN 13242:2002/A1:2007 & EN 13285:2003.
- [143] SN 670 140b (2001) *Gel*. Norme suisse.
- [144] SN 670 202-NA – 670 221a (div.) *Bitumes et liants bitumineux – Spécifications*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN 12591:2009, EN 13304:2009, EN 13305:2009, EN 13808:2005, EN 13924:2006/AC:2006, EN 14023:2010 & EN 15322:2009.
- [145] SN 670 241a – 670 275a-NA (div.) *Géosynthétiques*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN 13249:2000/A1:2005 – 13265:2000/A1:2005, EN 13361:2004/A1:2006, EN 13362:2005, EN 13491:2004/A1:2006 – 13493:2005, EN 15381:2008, EN 15382:2008, ISO/TR 20432:2007/C1:2008, ISO TS 13434:2008.
- [146] SN 670 300 – 670 321a (div.) *Reconnaissance et essais géotechniques*. Normes suisses – Annexes nationales aux normes EN ISO 22476-2:2005 – 22476-12:2009.
- [147] SN 670 362a (1991) *Poutre de Benkelman*. Norme suisse.
- [148] SN 670 422-NA (2005) *Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 22 : Essai d'orniérage*. Norme suisse – Annexe nationale à la norme EN 12697-22:2003.
- [149] SN 670 430b (2008) *Enrobés bitumineux compactés – Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place*. Norme suisse.

#### 9.4. Bibliographie sélective relative à la thèse

- [150] Rychen P., Dumont A.-G. (2013) *Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée – Analyse des performances pour le cas du changement de températures*. Projet OFROU n°2009/004.
- [151] Rychen P., Carter A., Dumont A.-G. (2013) *Methodology for evaluating climate change impact on asphalt pavement design life*. Transportation Research Board – 92nd Annual Meeting, Washington D.C.

- [152] El Faouzi N.-E., Rychen P. et al. (2011) *COST TU0702 - Real-time Monitoring, Surveillance and Control of Road Networks under Adverse Weather Conditions: Part I - Effects of weather on Traffic and Pavement: State of the Art and Best Practices*. Rapport COST.
- [153] Rychen P. (2010) *Température des enrobés in situ et en laboratoire - Refroidissement des enrobés en halle fosse et in situ*. Journée Technique LAVOC, Lausanne.
- [154] Rychen P. (2009) *Applicabilité des enrobés drainants sur les ouvrages d'art*. Journée Technique LAVOC, Lausanne.
- [155] Rodriguez M., Rychen P. (2008) *Données thermo-physiques des revêtements - Autoroute du Rhône A9 à Ardon*. Rapport LAVOC n°3080.
- [156] Rodriguez M., Rychen P., Dumont A.-G. (2008) *Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales*. Rapport OFROU n°635.



## 10. ANNEXES

### 10.1. Orniérage

#### 10.1.1. Modèle de comportement LAVOC [26]

##### Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

##### Modèle LAVOC

##### Formules

Formule :

$$T = C_{\theta} \cdot \alpha \cdot \left( \frac{C_W \cdot W}{1000 \cdot C_V} \right)^{\beta} + \delta$$

avec :

$$C_{\theta} = e^{\frac{\theta - 50}{10.8}} \quad C_V = 5 \cdot 10^{-5} \cdot V^{2.5177}$$

$$\theta = (d + (h \cdot c) + l) + 1.77 \cdot sd_{\max}$$

- Paramètres :**
- T... Profondeur d'ornièrre [mm]
  - C<sub>θ</sub>... Coefficient de calage pour la température [-]
  - θ... Température maximale pour une période de retour de 20 ans selon la méthode Angst [°C]
  - d... Température régionale de base en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer [°C]
  - h... Altitude au-dessus du niveau de la mer [km]
  - c... Gradient de température régional en fonction de l'altitude [°C/km]
  - l... Valeur corrective par rapport à la situation locale [°C]
  - sd<sub>max</sub>... Ecart-type standard en fonction de l'altitude (en km) [°C]
  - α, β... Paramètres issus de l'essai d'orniérage [-]
  - α... profondeur d'ornièrre à 1000 cycles [-]
  - β... Pente de la droite d'orniérage (axes en coordonnées logarithmiques) [-]
  - W... Nombre total d'essieux équivalents estimés qui passeront sur la chaussée étudiée [ESAL]
  - C<sub>W</sub>, δ... Constantes obtenues en maximisant corrélation ornières in situ - résultat du calcul prédictif [-]
  - C<sub>V</sub>... Coefficient de calage pour la vitesse [-]
  - V... Vitesse des véhicules [km/h]

|                     |                |           |     |
|---------------------|----------------|-----------|-----|
| <b>Constantes :</b> | C <sub>W</sub> | 5.128E-03 | [-] |
|                     | δ              | 4.9       | [-] |

|                     |                   |           |         |                              |
|---------------------|-------------------|-----------|---------|------------------------------|
| <b>Hypothèses :</b> | α                 | à définir | [-]     | Selon type de matériau       |
|                     | β                 | à définir | [-]     | Selon type de matériau       |
|                     | W                 | à définir | [ESAL]  | Selon trafic                 |
|                     | V                 | à définir | [km/h]  | Selon trafic                 |
|                     | d                 | à définir | [°C]    | Selon situation géographique |
|                     | h                 | à définir | [km]    | Selon situation géographique |
|                     | c                 | à définir | [°C/km] | Selon situation géographique |
|                     | l                 | à définir | [°C]    | Selon situation géographique |
|                     | sd <sub>max</sub> | à définir | [°C]    | Selon situation géographique |

Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

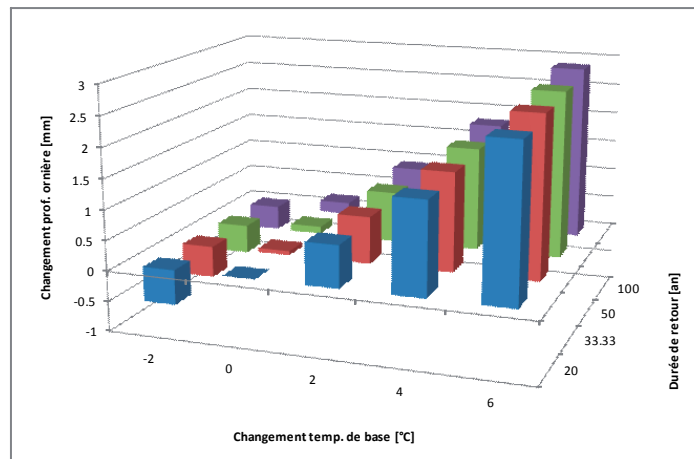
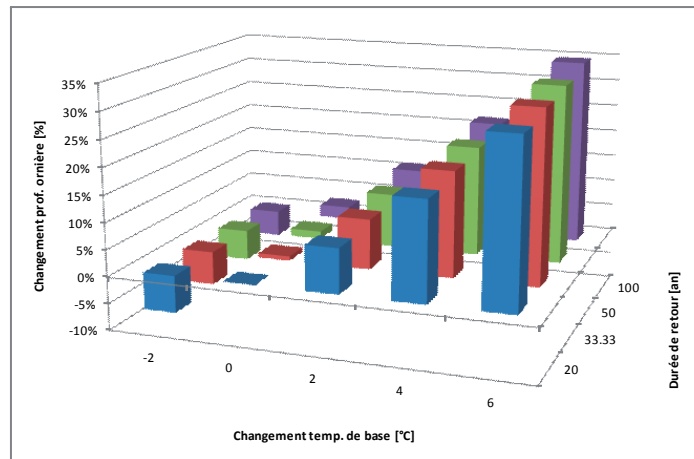
Modèle LAVOC

Exemple - Autoroute à Lonay

**Hypothèses :**

|                           |            |        |   |
|---------------------------|------------|--------|---|
| $\alpha$                  | 2.111      | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| $\beta$                   | 0.293      | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| W                         | 13'172'339 | [ESAL] | (selon rapport LAVOC)   |
| Durée de vie              | 19         | [ans]  | (selon rapport LAVOC)   |
| V                         | 90         | [km/h] | (selon rapport LAVOC)   |
| h                         | 0.395      | [km]   | (altitude Lonay)  |
| l                         | 0          | [°C]   | (situation locale libre)  |
| sd <sub>max</sub>         | 0.89085    | [°C]   | (écart-type standard Lonay)   |
| $\theta_{max,50\%}$       | 44.9150    | [°C]   | (Moyenne des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm) |
| $\theta_{max,95\%,Angst}$ | 46.4918    | [°C]   | (selon méthode Angst)   |
| $\theta_{max,95\%}$       | 46.3803    | [°C]   | (selon méthode statistique : 95% quantile)  |
| $\theta_{max,98\%}$       | 46.7446    | [°C]   | (selon méthode statistique : 98% quantile)  |
| T <sub>calc</sub>         | 8.35       | [mm]   | (selon calcul méthode LAVOC)  |

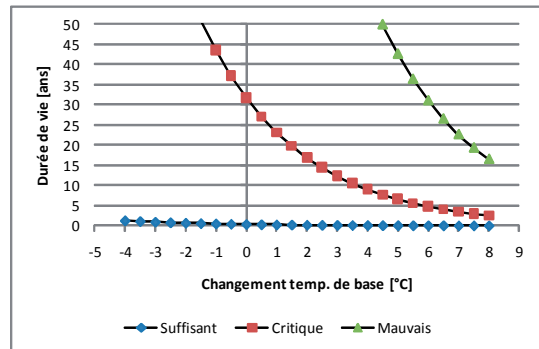
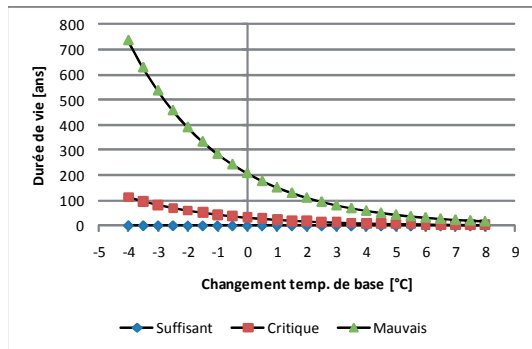
| Quantile x [%] | Durée de retour [an] | Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,x\%}$ [°C] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [%] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [mm] |
|----------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 95.0           | 20                   | -2.0                                | 44.3803                            | -6.94%                             | -0.58                               |
| 95.0           | 20                   | 0.0                                 | 46.3803                            | 0.00%                              | 0.00                                |
| 95.0           | 20                   | 2.0                                 | 48.3803                            | 8.35%                              | 0.69                                |
| 95.0           | 20                   | 4.0                                 | 50.3803                            | 18.40%                             | 1.53                                |
| 95.0           | 20                   | 6.0                                 | 52.3803                            | 30.49%                             | 2.53                                |
| 97.0           | 33.33                | -2.0                                | 44.5905                            | -6.27%                             | -0.52                               |
| 97.0           | 33.33                | 0.0                                 | 46.5905                            | 0.81%                              | 0.07                                |
| 97.0           | 33.33                | 2.0                                 | 48.5905                            | 9.32%                              | 0.77                                |
| 97.0           | 33.33                | 4.0                                 | 50.5905                            | 19.57%                             | 1.63                                |
| 97.0           | 33.33                | 6.0                                 | 52.5905                            | 31.90%                             | 2.65                                |
| 98.0           | 50                   | -2.0                                | 44.7446                            | -5.77%                             | -0.48                               |
| 98.0           | 50                   | 0.0                                 | 46.7446                            | 1.41%                              | 0.12                                |
| 98.0           | 50                   | 2.0                                 | 48.7446                            | 10.05%                             | 0.83                                |
| 98.0           | 50                   | 4.0                                 | 50.7446                            | 20.44%                             | 1.70                                |
| 98.0           | 50                   | 6.0                                 | 52.7446                            | 32.95%                             | 2.74                                |
| 99.0           | 100                  | -2.0                                | 44.9874                            | -4.97%                             | -0.41                               |
| 99.0           | 100                  | 0.0                                 | 46.9874                            | 2.37%                              | 0.20                                |
| 99.0           | 100                  | 2.0                                 | 48.9874                            | 11.21%                             | 0.93                                |
| 99.0           | 100                  | 4.0                                 | 50.9874                            | 21.84%                             | 1.82                                |
| 99.0           | 100                  | 6.0                                 | 52.9874                            | 34.63%                             | 2.88                                |



## Annexes

Trafic total : 13'172'339 [ESAL] (selon rapport LAVOC)  
 Durée de vie : 19 [ans] (selon rapport LAVOC)  
 Trafic annuel : 693'281 [ESAL]

| Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,98\%}$ [°C] | Prof. ornière T [mm] | Durée de vie [ESAL] |            |             | Durée de vie [ans] |          |         |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|------------|-------------|--------------------|----------|---------|
|                                     |                                     |                      | Suffisant           | Critique   | Mauvais     | Suffisant          | Critique | Mauvais |
| -4.0                                | 42.7446                             | 7.34                 | 868'624             | 78'037'922 | 510'038'671 | 1.25               | 112.56   | 735.69  |
| -3.5                                | 43.2446                             | 7.45                 | 741'468             | 66'614'146 | 435'375'385 | 1.07               | 96.09    | 627.99  |
| -3.0                                | 43.7446                             | 7.57                 | 632'926             | 56'862'667 | 371'641'870 | 0.91               | 82.02    | 536.06  |
| -2.5                                | 44.2446                             | 7.70                 | 540'274             | 48'538'684 | 317'238'146 | 0.78               | 70.01    | 457.59  |
| -2.0                                | 44.7446                             | 7.83                 | 461'184             | 41'433'227 | 270'798'446 | 0.67               | 59.76    | 390.60  |
| -1.5                                | 45.2446                             | 7.97                 | 393'673             | 35'367'921 | 231'156'939 | 0.57               | 51.02    | 333.42  |
| -1.0                                | 45.7446                             | 8.12                 | 336'044             | 30'190'499 | 197'318'452 | 0.48               | 43.55    | 284.62  |
| -0.5                                | 46.2446                             | 8.27                 | 286'851             | 25'770'987 | 168'433'497 | 0.41               | 37.17    | 242.95  |
| 0.0                                 | 46.7446                             | 8.43                 | 244'860             | 21'998'437 | 143'776'938 | 0.35               | 31.73    | 207.39  |
| 0.5                                 | 47.2446                             | 8.60                 | 209'016             | 18'778'141 | 122'729'792 | 0.30               | 27.09    | 177.03  |
| 1.0                                 | 47.7446                             | 8.77                 | 178'418             | 16'029'256 | 104'763'684 | 0.26               | 23.12    | 151.11  |
| 1.5                                 | 48.2446                             | 8.95                 | 152'300             | 13'682'773 | 89'427'590  | 0.22               | 19.74    | 128.99  |
| 2.0                                 | 48.7446                             | 9.15                 | 130'005             | 11'679'786 | 76'336'509  | 0.19               | 16.85    | 110.11  |
| 2.5                                 | 49.2446                             | 9.35                 | 110'974             | 9'970'011  | 65'161'798  | 0.16               | 14.38    | 93.99   |
| 3.0                                 | 49.7446                             | 9.56                 | 94'729              | 8'510'526  | 55'622'925  | 0.14               | 12.28    | 80.23   |
| 3.5                                 | 50.2446                             | 9.78                 | 80'862              | 7'264'692  | 47'480'424  | 0.12               | 10.48    | 68.49   |
| 4.0                                 | 50.7446                             | 10.01                | 69'025              | 6'201'232  | 40'529'884  | 0.10               | 8.94     | 58.46   |
| 4.5                                 | 51.2446                             | 10.25                | 58'920              | 5'293'449  | 34'596'815  | 0.08               | 7.64     | 49.90   |
| 5.0                                 | 51.7446                             | 10.51                | 50'295              | 4'518'554  | 29'532'274  | 0.07               | 6.52     | 42.60   |
| 5.5                                 | 52.2446                             | 10.77                | 42'932              | 3'857'094  | 25'209'118  | 0.06               | 5.56     | 36.36   |
| 6.0                                 | 52.7446                             | 11.05                | 36'648              | 3'292'464  | 21'518'818  | 0.05               | 4.75     | 31.04   |
| 6.5                                 | 53.2446                             | 11.34                | 31'283              | 2'810'488  | 18'368'732  | 0.05               | 4.05     | 26.50   |
| 7.0                                 | 53.7446                             | 11.65                | 26'704              | 2'399'068  | 15'679'780  | 0.04               | 3.46     | 22.62   |
| 7.5                                 | 54.2446                             | 11.97                | 22'794              | 2'047'874  | 13'384'456  | 0.03               | 2.95     | 19.31   |
| 8.0                                 | 54.7446                             | 12.30                | 19'458              | 1'748'091  | 11'425'139  | 0.03               | 2.52     | 16.48   |



Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

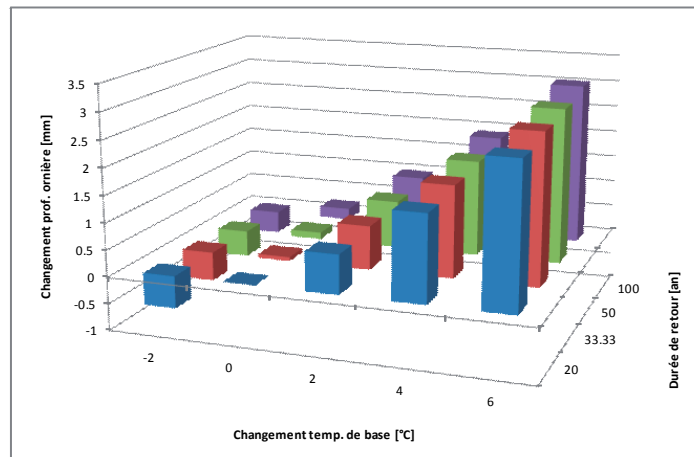
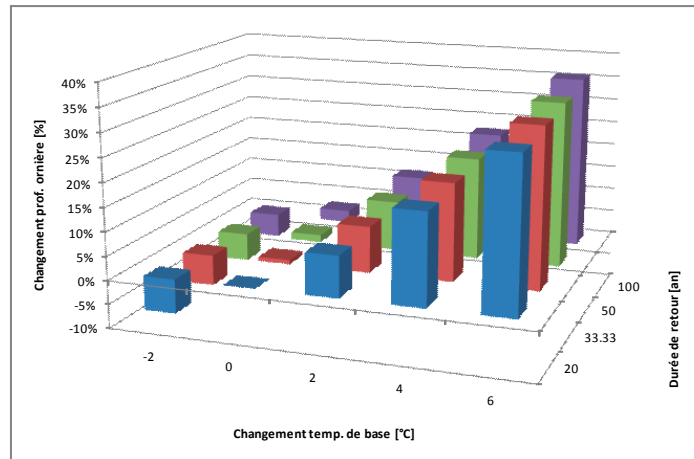
Modèle LAVOC

Exemple - Route Principale à Kleingurmels

**Hypothèses :**

|                           |           |        |   |
|---------------------------|-----------|--------|---|
| $\alpha$                  | 1.936     | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| $\beta$                   | 0.405     | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| W                         | 2'464'813 | [ESAL] | (selon rapport LAVOC)   |
| Durée de vie              | 24        | [ans]  | (selon rapport LAVOC)   |
| V                         | 53        | [km/h] | (selon rapport LAVOC)   |
| h                         | 0.558     | [km]   | (altitude Kleingurmels)   |
| l                         | 0         | [°C]   | (situation locale libre)  |
| sd <sub>max</sub>         | 0.92834   | [°C]   | (écart-type standard Kleingurmels)  |
| $\theta_{max,50\%}$       | 44.4260   | [°C]   | (Moyenne des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm) |
| $\theta_{max,95\%,Angst}$ | 46.0692   | [°C]   | (selon méthode Angst)   |
| $\theta_{max,95\%}$       | 45.9530   | [°C]   | (selon méthode statistique : 95% quantile)  |
| $\theta_{max,98\%}$       | 46.3326   | [°C]   | (selon méthode statistique : 98% quantile)  |
| T <sub>calc</sub>         | 8.52      | [mm]   | (selon calcul méthode LAVOC)  |

| Quantile x [%] | Durée de retour [an] | Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,x\%}$ [°C] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [%] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [mm] |
|----------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 95.0           | 20                   | -2.0                                | 43.9530                            | -7.14%                             | -0.61                               |
| 95.0           | 20                   | 0.0                                 | 45.9530                            | 0.00%                              | 0.00                                |
| 95.0           | 20                   | 2.0                                 | 47.9530                            | 8.59%                              | 0.73                                |
| 95.0           | 20                   | 4.0                                 | 49.9530                            | 18.93%                             | 1.61                                |
| 95.0           | 20                   | 6.0                                 | 51.9530                            | 31.38%                             | 2.66                                |
| 97.0           | 33.33                | -2.0                                | 44.1720                            | -6.42%                             | -0.54                               |
| 97.0           | 33.33                | 0.0                                 | 46.1720                            | 0.87%                              | 0.07                                |
| 97.0           | 33.33                | 2.0                                 | 48.1720                            | 9.63%                              | 0.82                                |
| 97.0           | 33.33                | 4.0                                 | 50.1720                            | 20.19%                             | 1.71                                |
| 97.0           | 33.33                | 6.0                                 | 52.1720                            | 32.88%                             | 2.79                                |
| 98.0           | 50                   | -2.0                                | 44.3326                            | -5.88%                             | -0.50                               |
| 98.0           | 50                   | 0.0                                 | 46.3326                            | 1.51%                              | 0.13                                |
| 98.0           | 50                   | 2.0                                 | 48.3326                            | 10.41%                             | 0.88                                |
| 98.0           | 50                   | 4.0                                 | 50.3326                            | 21.12%                             | 1.79                                |
| 98.0           | 50                   | 6.0                                 | 52.3326                            | 34.01%                             | 2.88                                |
| 99.0           | 100                  | -2.0                                | 44.5856                            | -5.02%                             | -0.43                               |
| 99.0           | 100                  | 0.0                                 | 46.5856                            | 2.55%                              | 0.22                                |
| 99.0           | 100                  | 2.0                                 | 48.5856                            | 11.66%                             | 0.99                                |
| 99.0           | 100                  | 4.0                                 | 50.5856                            | 22.62%                             | 1.92                                |
| 99.0           | 100                  | 6.0                                 | 52.5856                            | 35.82%                             | 3.04                                |

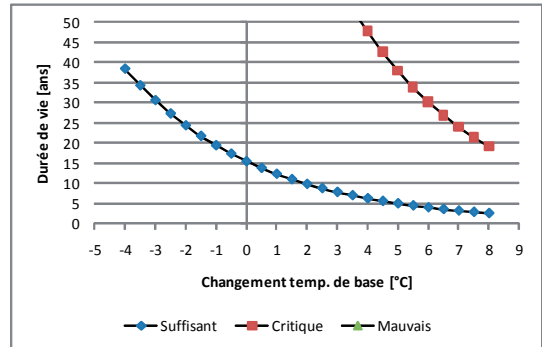
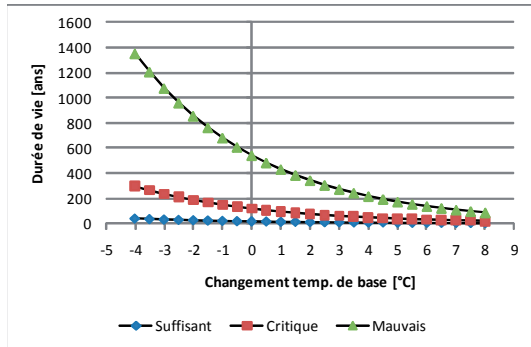




## Annexes

Trafic total : 2'464'813 [ESAL] (selon rapport LAVOC)  
 Durée de vie : 24 [ans] (selon rapport LAVOC)  
 Trafic annuel : 102'701 [ESAL]

| Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,98\%}$ [°C] | Prof. ornière T [mm] | Durée de vie [ESAL] |            |             | Durée de vie [ans] |          |         |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|------------|-------------|--------------------|----------|---------|
|                                     |                                     |                      | Suffisant           | Critique   | Mauvais     | Suffisant          | Critique | Mauvais |
| -4.0                                | 42.3326                             | 7.46                 | 3'944'986           | 30'511'236 | 138'394'796 | 38.41              | 297.09   | 1347.56 |
| -3.5                                | 42.8326                             | 7.58                 | 3'518'947           | 27'216'173 | 123'448'840 | 34.26              | 265.01   | 1202.03 |
| -3.0                                | 43.3326                             | 7.71                 | 3'138'918           | 24'276'961 | 110'116'973 | 30.56              | 236.39   | 1072.21 |
| -2.5                                | 43.8326                             | 7.84                 | 2'799'930           | 21'655'168 | 98'224'883  | 27.26              | 210.86   | 956.42  |
| -2.0                                | 44.3326                             | 7.98                 | 2'497'552           | 19'316'517 | 87'617'079  | 24.32              | 188.09   | 853.13  |
| -1.5                                | 44.8326                             | 8.13                 | 2'227'828           | 17'230'428 | 78'154'866  | 21.69              | 167.77   | 761.00  |
| -1.0                                | 45.3326                             | 8.28                 | 1'987'234           | 15'369'627 | 69'714'526  | 19.35              | 149.65   | 678.81  |
| -0.5                                | 45.8326                             | 8.44                 | 1'772'622           | 13'709'783 | 62'185'700  | 17.26              | 133.49   | 605.51  |
| 0.0                                 | 46.3326                             | 8.61                 | 1'581'188           | 12'229'194 | 55'469'951  | 15.40              | 119.08   | 540.11  |
| 0.5                                 | 46.8326                             | 8.79                 | 1'410'427           | 10'908'501 | 49'479'469  | 13.73              | 106.22   | 481.78  |
| 1.0                                 | 47.3326                             | 8.97                 | 1'258'108           | 9'730'437  | 44'135'930  | 12.25              | 94.75    | 429.75  |
| 1.5                                 | 47.8326                             | 9.16                 | 1'122'239           | 8'679'597  | 39'369'467  | 10.93              | 84.51    | 383.34  |
| 2.0                                 | 48.3326                             | 9.37                 | 1'001'042           | 7'742'244  | 35'117'759  | 9.75               | 75.39    | 341.94  |
| 2.5                                 | 48.8326                             | 9.58                 | 892'935             | 6'906'120  | 31'325'214  | 8.69               | 67.25    | 305.02  |
| 3.0                                 | 49.3326                             | 9.80                 | 796'502             | 6'160'293  | 27'942'245  | 7.76               | 59.98    | 272.07  |
| 3.5                                 | 49.8326                             | 10.03                | 710'484             | 5'495'011  | 24'924'620  | 6.92               | 53.51    | 242.69  |
| 4.0                                 | 50.3326                             | 10.27                | 633'755             | 4'901'577  | 22'232'884  | 6.17               | 47.73    | 216.48  |
| 4.5                                 | 50.8326                             | 10.53                | 565'313             | 4'372'231  | 19'831'842  | 5.50               | 42.57    | 193.10  |
| 5.0                                 | 51.3326                             | 10.80                | 504'262             | 3'900'052  | 17'690'101  | 4.91               | 37.97    | 172.25  |
| 5.5                                 | 51.8326                             | 11.07                | 449'804             | 3'478'865  | 15'779'657  | 4.38               | 33.87    | 153.65  |
| 6.0                                 | 52.3326                             | 11.37                | 401'227             | 3'103'165  | 14'075'532  | 3.91               | 30.22    | 137.05  |
| 6.5                                 | 52.8326                             | 11.67                | 357'897             | 2'768'038  | 12'555'444  | 3.48               | 26.95    | 122.25  |
| 7.0                                 | 53.3326                             | 11.99                | 319'246             | 2'469'104  | 11'199'518  | 3.11               | 24.04    | 109.05  |
| 7.5                                 | 53.8326                             | 12.33                | 284'769             | 2'202'453  | 9'990'025   | 2.77               | 21.45    | 97.27   |
| 8.0                                 | 54.3326                             | 12.68                | 254'015             | 1'964'599  | 8'911'151   | 2.47               | 19.13    | 86.77   |



Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

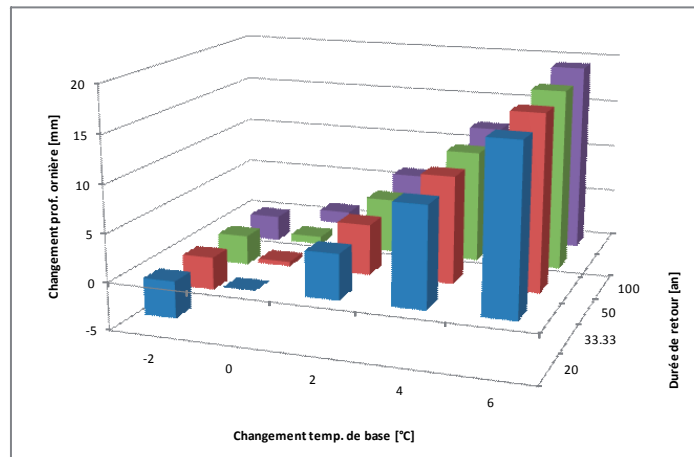
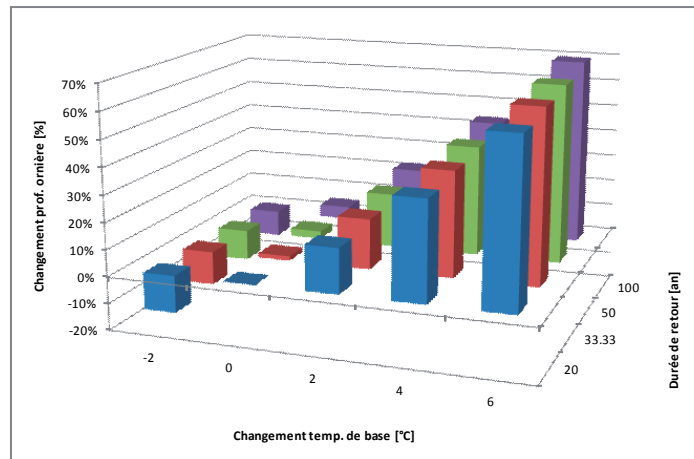
Modèle LAVOC

Exemple - Route Principale à Delémont

**Hypothèses :**

|                           |           |        |   |
|---------------------------|-----------|--------|---|
| $\alpha$                  | 6.292     | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| $\beta$                   | 0.694     | [-]    | (selon essai d'orniérage LAVOC)   |
| W                         | 2'051'390 | [ESAL] | (selon rapport LAVOC)   |
| Durée de vie              | 20        | [ans]  | (selon rapport LAVOC)   |
| V                         | 51        | [km/h] | (selon rapport LAVOC)   |
| h                         | 0.420     | [km]   | (altitude Delémont)   |
| l                         | 0         | [°C]   | (situation locale libre)  |
| sd <sub>max</sub>         | 0.8966    | [°C]   | (écart-type standard Delémont)  |
| $\theta_{max,50\%}$       | 44.8000   | [°C]   | (Moyenne des maximaux journaliers de la température de revêtement durant la période des 7 jours les plus chauds à une profondeur de 2 cm) |
| $\theta_{max,95\%,Angst}$ | 46.3870   | [°C]   | (selon méthode Angst)   |
| $\theta_{max,95\%}$       | 46.2748   | [°C]   | (selon méthode statistique : 95% quantile)  |
| $\theta_{max,98\%}$       | 46.3326   | [°C]   | (selon méthode statistique : 98% quantile)  |
| T <sub>calc</sub>         | 28.04     | [mm]   | (selon calcul méthode LAVOC)  |

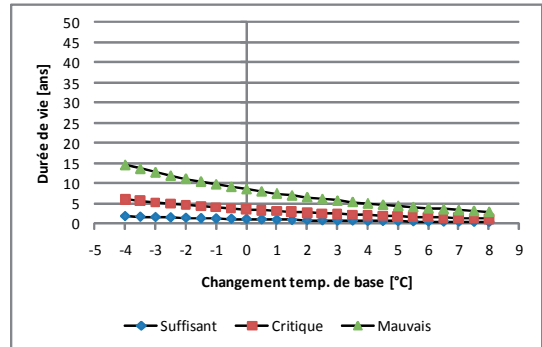
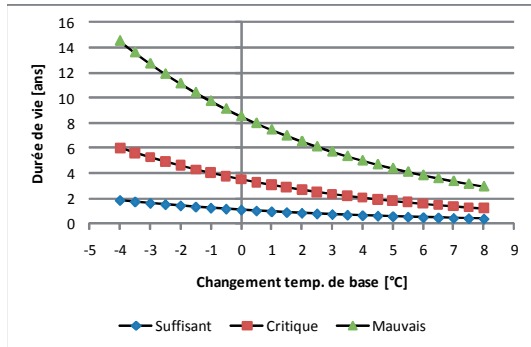
| Centile x [%] | Durée de retour [an] | Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,x\%}$ [°C] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [%] | Chgmt prof. ornière $\Delta T$ [mm] |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 95.0          | 20                   | -2.0                                | 44.2748                            | -13.93%                            | -3.87                               |
| 95.0          | 20                   | 0.0                                 | 46.2748                            | 0.00%                              | 0.00                                |
| 95.0          | 20                   | 2.0                                 | 48.2748                            | 16.76%                             | 4.66                                |
| 95.0          | 20                   | 4.0                                 | 50.2748                            | 36.93%                             | 10.27                               |
| 95.0          | 20                   | 6.0                                 | 52.2748                            | 61.20%                             | 17.01                               |
| 97.0          | 33.33                | -2.0                                | 44.4863                            | -12.57%                            | -3.50                               |
| 97.0          | 33.33                | 0.0                                 | 46.4863                            | 1.63%                              | 0.45                                |
| 97.0          | 33.33                | 2.0                                 | 48.4863                            | 18.72%                             | 5.20                                |
| 97.0          | 33.33                | 4.0                                 | 50.4863                            | 39.29%                             | 10.92                               |
| 97.0          | 33.33                | 6.0                                 | 52.4863                            | 64.04%                             | 17.80                               |
| 98.0          | 50                   | -2.0                                | 44.6414                            | -11.56%                            | -3.21                               |
| 98.0          | 50                   | 0.0                                 | 46.6414                            | 2.84%                              | 0.79                                |
| 98.0          | 50                   | 2.0                                 | 48.6414                            | 20.18%                             | 5.61                                |
| 98.0          | 50                   | 4.0                                 | 50.6414                            | 41.05%                             | 11.41                               |
| 98.0          | 50                   | 6.0                                 | 52.6414                            | 66.15%                             | 18.39                               |
| 99.0          | 100                  | -2.0                                | 44.8858                            | -9.94%                             | -2.76                               |
| 99.0          | 100                  | 0.0                                 | 46.8858                            | 4.79%                              | 1.33                                |
| 99.0          | 100                  | 2.0                                 | 48.8858                            | 22.53%                             | 6.26                                |
| 99.0          | 100                  | 4.0                                 | 50.8858                            | 43.87%                             | 12.20                               |
| 99.0          | 100                  | 6.0                                 | 52.8858                            | 69.55%                             | 19.34                               |



## Annexes

Trafic total : 2'051'390 [ESAL] (selon rapport LAVOC)  
 Durée de vie : 20 [ans] (selon rapport LAVOC)  
 Trafic annuel : 102'570 [ESAL]

| Chgmt temp. de base $\Delta d$ [°C] | Temp. site $\theta_{max,98\%}$ [°C] | Prof. ornière T [mm] | Durée de vie [ESAL] |          |           | Durée de vie [ans] |          |         |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|----------|-----------|--------------------|----------|---------|
|                                     |                                     |                      | Suffisant           | Critique | Mauvais   | Suffisant          | Critique | Mauvais |
| -4.0                                | 42.6414                             | 21.26                | 186'887             | 616'508  | 1'489'625 | 1.82               | 6.01     | 14.52   |
| -3.5                                | 43.1414                             | 22.03                | 174'832             | 576'739  | 1'393'535 | 1.70               | 5.62     | 13.59   |
| -3.0                                | 43.6414                             | 22.85                | 163'554             | 539'536  | 1'303'644 | 1.59               | 5.26     | 12.71   |
| -2.5                                | 44.1414                             | 23.70                | 153'004             | 504'733  | 1'219'551 | 1.49               | 4.92     | 11.89   |
| -2.0                                | 44.6414                             | 24.59                | 143'134             | 472'175  | 1'140'883 | 1.40               | 4.60     | 11.12   |
| -1.5                                | 45.1414                             | 25.52                | 133'901             | 441'717  | 1'067'289 | 1.31               | 4.31     | 10.41   |
| -1.0                                | 45.6414                             | 26.50                | 125'264             | 413'223  | 998'442   | 1.22               | 4.03     | 9.73    |
| -0.5                                | 46.1414                             | 27.52                | 117'184             | 386'568  | 934'037   | 1.14               | 3.77     | 9.11    |
| 0.0                                 | 46.6414                             | 28.59                | 109'625             | 361'632  | 873'786   | 1.07               | 3.53     | 8.52    |
| 0.5                                 | 47.1414                             | 29.72                | 102'553             | 338'304  | 817'422   | 1.00               | 3.30     | 7.97    |
| 1.0                                 | 47.6414                             | 30.89                | 95'938              | 316'482  | 764'693   | 0.94               | 3.09     | 7.46    |
| 1.5                                 | 48.1414                             | 32.12                | 89'749              | 296'067  | 715'366   | 0.88               | 2.89     | 6.97    |
| 2.0                                 | 48.6414                             | 33.41                | 83'960              | 276'969  | 669'220   | 0.82               | 2.70     | 6.52    |
| 2.5                                 | 49.1414                             | 34.76                | 78'544              | 259'103  | 626'052   | 0.77               | 2.53     | 6.10    |
| 3.0                                 | 49.6414                             | 36.18                | 73'477              | 242'389  | 585'668   | 0.72               | 2.36     | 5.71    |
| 3.5                                 | 50.1414                             | 37.66                | 68'738              | 226'753  | 547'888   | 0.67               | 2.21     | 5.34    |
| 4.0                                 | 50.6414                             | 39.21                | 64'304              | 212'126  | 512'546   | 0.63               | 2.07     | 5.00    |
| 4.5                                 | 51.1414                             | 40.84                | 60'156              | 198'443  | 479'484   | 0.59               | 1.93     | 4.67    |
| 5.0                                 | 51.6414                             | 42.54                | 56'275              | 185'642  | 448'554   | 0.55               | 1.81     | 4.37    |
| 5.5                                 | 52.1414                             | 44.33                | 52'645              | 173'667  | 419'620   | 0.51               | 1.69     | 4.09    |
| 6.0                                 | 52.6414                             | 46.19                | 49'249              | 162'465  | 392'552   | 0.48               | 1.58     | 3.83    |
| 6.5                                 | 53.1414                             | 48.15                | 46'072              | 151'985  | 367'230   | 0.45               | 1.48     | 3.58    |
| 7.0                                 | 53.6414                             | 50.20                | 43'100              | 142'181  | 343'542   | 0.42               | 1.39     | 3.35    |
| 7.5                                 | 54.1414                             | 52.35                | 40'320              | 133'009  | 321'381   | 0.39               | 1.30     | 3.13    |
| 8.0                                 | 54.6414                             | 54.59                | 37'719              | 124'429  | 300'650   | 0.37               | 1.21     | 2.93    |



## 10.1.2. Modèle de comportement BRRC [19]

## Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

## Modèle BRRC

## Formules

Formule :

$$u_{perm} = \sum_i h_i \cdot \varepsilon_{pi}$$

avec :

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2 \cdot E_p(V, T)} \cdot \left[ \frac{N}{450 \cdot V} \right]^{1/4}$$

**Paramètres :**  $u_{perm}$ ... Déplacement permanent en surface [mm] $h_i$ ... Epaisseur de la couche  $i$  [mm] $\varepsilon_{pi}$ ... Déformation permanente de la couche  $i$  [-] $\sigma_v, \sigma_h$ ... Contraintes principales verticales et horizontales sous l'effet d'une charge [MPa] $E_p(V, T)$ ... Module de déformation permanente [MPa] $V$ ... Vitesse du véhicule [km/h] $T$ ... Température [°C] $N$ ... Nombre de cycles de charge [-]**Constantes :**

-

**Hypothèses :**

|                      |           |        |                                  |
|----------------------|-----------|--------|----------------------------------|
| $\sigma_v, \sigma_h$ | à définir | [-]    | Selon type de matériau           |
| $E_p(V, T)$          | à définir | [MPa]  | Selon type de matériau           |
| $V$                  | à définir | [km/h] | Selon trafic                     |
| $T$                  | à définir | [°C]   | Selon conditions météorologiques |
| $N$                  | à définir | [-]    | Selon trafic                     |
| $h_i$                | à définir | [mm]   | Selon dimensionnement route      |

**Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures**

**Modèle BRRC**

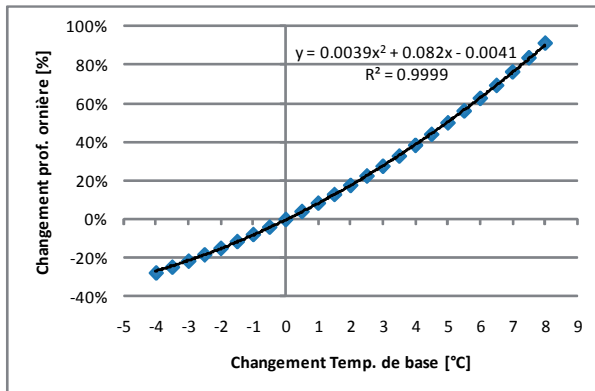
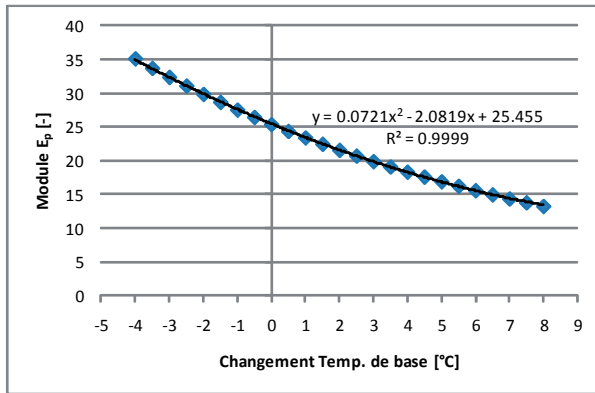
**Exemple - Autoroute à Lonay**

**Hypothèses :** Enrobé de type AC 16 / AC T22 => Calcul des modules à l'aide du logiciel PAMINA

|                             |       |                       |                                       |
|-----------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| V                           | 90    | [km/h]                | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>max</sub>            | 46.49 | [°C]                  | (selon méthode Angst)                 |
| v                           | 2.75  | [%]                   | (selon rapport LAVOC)                 |
| V <sub>A</sub> (pierre)     | 63    | [%]                   | (>2mm ; selon rapport LAVOC)          |
| V <sub>A</sub> (sable)      | 28.3  | [%]                   | (>0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| V <sub>A</sub> (filler)     | 8.7   | [%]                   | (<0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| conc                        | 100   | [%]                   | (matériaux concassés)                 |
| V <sub>I</sub>              | 5.77  | [%]                   | (sur granulats ; selon rapport LAVOC) |
| pen                         | 42    | [10 <sup>-1</sup> mm] | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>A&amp;B</sub> (=TRB) | 59.6  | [°C]                  | (selon rapport LAVOC)                 |

| E <sub>p</sub> [Mpa] : | Vitesse V [km/h] | Température T [°C] |       |       |       |       |       |      |
|------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                        |                  | -20                | -10   | 0     | 10    | 20    | 30    | 40   |
|                        | 10               | 644.1              | 528.2 | 383.5 | 249.0 | 123.8 | 49.5  | 21.0 |
|                        | 20               | 656.7              | 556.6 | 412.1 | 277.7 | 152.4 | 61.9  | 26.3 |
|                        | 30               | 663.2              | 571.9 | 428.9 | 294.4 | 169.1 | 70.6  | 29.9 |
|                        | 40               | 667.5              | 581.9 | 440.8 | 306.3 | 181.0 | 77.5  | 32.9 |
|                        | 50               | 670.6              | 589.2 | 450.0 | 315.5 | 190.2 | 83.3  | 35.3 |
|                        | 60               | 673.0              | 595.0 | 457.6 | 323.1 | 197.8 | 88.4  | 37.5 |
|                        | 70               | 675.0              | 599.6 | 463.9 | 329.5 | 204.2 | 92.9  | 39.4 |
|                        | 80               | 676.6              | 603.5 | 469.5 | 335.0 | 209.7 | 97.0  | 41.1 |
|                        | 90               | 678.1              | 606.9 | 474.3 | 339.8 | 214.5 | 100.8 | 42.7 |
|                        | 100              | 679.3              | 609.8 | 478.7 | 344.2 | 218.9 | 104.3 | 44.2 |

| Température T [°C] | Chgmt temp. ΔT [°C] | Module E <sub>p</sub> [MPa] | Chgmt prof. ornière Δu <sub>perm</sub> [%] |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| 46.49              | -4                  | 35.093                      | -27.67%                                    |
| 46.49              | -3.5                | 33.700                      | -24.69%                                    |
| 46.49              | -3                  | 32.363                      | -21.57%                                    |
| 46.49              | -2.5                | 31.078                      | -18.33%                                    |
| 46.49              | -2                  | 29.845                      | -14.96%                                    |
| 46.49              | -1.5                | 28.660                      | -11.44%                                    |
| 46.49              | -1                  | 27.523                      | -7.78%                                     |
| 46.49              | -0.5                | 26.430                      | -3.97%                                     |
| 46.49              | 0                   | 25.381                      | 0.00%                                      |
| 46.49              | 0.5                 | 24.374                      | 4.13%                                      |
| 46.49              | 1                   | 23.406                      | 8.44%                                      |
| 46.49              | 1.5                 | 22.477                      | 12.92%                                     |
| 46.49              | 2                   | 21.585                      | 17.59%                                     |
| 46.49              | 2.5                 | 20.728                      | 22.45%                                     |
| 46.49              | 3                   | 19.906                      | 27.51%                                     |
| 46.49              | 3.5                 | 19.116                      | 32.78%                                     |
| 46.49              | 4                   | 18.357                      | 38.26%                                     |
| 46.49              | 4.5                 | 17.628                      | 43.98%                                     |
| 46.49              | 5                   | 16.929                      | 49.93%                                     |
| 46.49              | 5.5                 | 16.257                      | 56.13%                                     |
| 46.49              | 6                   | 15.611                      | 62.58%                                     |
| 46.49              | 6.5                 | 14.992                      | 69.30%                                     |
| 46.49              | 7                   | 14.397                      | 76.30%                                     |
| 46.49              | 7.5                 | 13.825                      | 83.58%                                     |
| 46.49              | 8                   | 13.277                      | 91.17%                                     |



**Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures**

**Modèle BRRC**

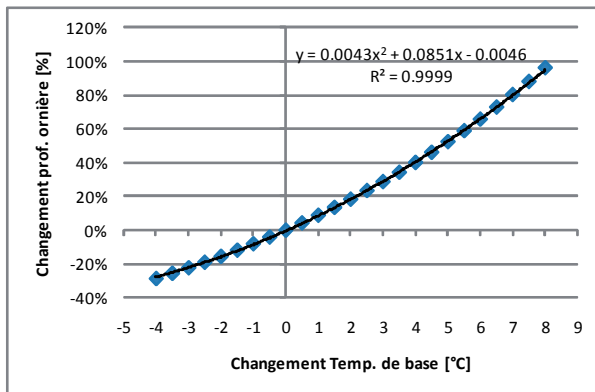
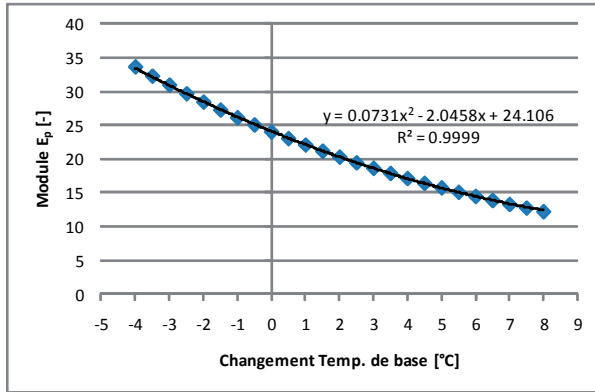
**Exemple - Route Principale à Kleingurmels**

**Hypothèses :** Enrobé de type AC 10 N / AC T 11 => Calcul des modules à l'aide du logiciel PAMINA

|                             |       |                       |                                       |
|-----------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| V                           | 53    | [km/h]                | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>max</sub>            | 46.07 | [°C]                  | (selon méthode Angst)                 |
| v                           | 1.97  | [%]                   | (selon rapport LAVOC)                 |
| V <sub>A</sub> (pierre)     | 55.5  | [%]                   | (>2mm ; selon rapport LAVOC)          |
| V <sub>A</sub> (sable)      | 35.7  | [%]                   | (>0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| V <sub>A</sub> (filler)     | 8.8   | [%]                   | (<0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| conc                        | 100   | [%]                   | (matériaux concassés)                 |
| V <sub>I</sub>              | 6.15  | [%]                   | (sur granulats ; selon rapport LAVOC) |
| pen                         | 42    | [10 <sup>-1</sup> mm] | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>A&amp;B</sub> (=TRB) | 58.9  | [°C]                  | (selon rapport LAVOC)                 |

| E <sub>p</sub> [Mpa] : | Vitesse V [km/h] | Température T [°C] |       |       |       |       |       |      |
|------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                        |                  | -20                | -10   | 0     | 10    | 20    | 30    | 40   |
| 10                     |                  | 692.9              | 573.2 | 417.0 | 271.9 | 136.6 | 53.3  | 22.1 |
| 20                     |                  | 705.7              | 603.2 | 447.9 | 302.8 | 167.6 | 67.1  | 27.8 |
| 30                     |                  | 712.3              | 618.9 | 466.0 | 320.9 | 185.7 | 76.8  | 31.8 |
| 40                     |                  | 716.6              | 629.2 | 478.9 | 333.7 | 198.5 | 84.5  | 35.0 |
| 50                     |                  | 719.8              | 636.7 | 488.8 | 343.7 | 208.4 | 91.0  | 37.7 |
| 53                     |                  | 720.0              | 637.2 | 491.4 | 346.3 | 211.1 | 94.5  | 39.2 |
| 60                     |                  | 722.3              | 642.6 | 497.0 | 351.8 | 216.6 | 96.7  | 40.1 |
| 70                     |                  | 724.3              | 647.4 | 503.9 | 358.7 | 223.5 | 101.8 | 42.2 |
| 80                     |                  | 726.0              | 651.4 | 509.8 | 364.7 | 229.4 | 106.4 | 44.1 |
| 90                     |                  | 727.4              | 654.8 | 515.1 | 369.9 | 234.7 | 110.7 | 45.9 |
| 100                    |                  | 728.7              | 657.8 | 519.8 | 374.6 | 239.4 | 114.7 | 47.5 |

| Température T [°C] | Chgmt temp. ΔT [°C] | Module E <sub>p</sub> [MPa] | Chgmt prof. ornière Δu <sub>perm</sub> [%] |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| 46.07              | -4                  | 33.623                      | -28.54%                                    |
| 46.07              | -3.5                | 32.240                      | -25.47%                                    |
| 46.07              | -3                  | 30.914                      | -22.28%                                    |
| 46.07              | -2.5                | 29.642                      | -18.94%                                    |
| 46.07              | -2                  | 28.423                      | -15.46%                                    |
| 46.07              | -1.5                | 27.254                      | -11.84%                                    |
| 46.07              | -1                  | 26.133                      | -8.06%                                     |
| 46.07              | -0.5                | 25.058                      | -4.11%                                     |
| 46.07              | 0                   | 24.028                      | 0.00%                                      |
| 46.07              | 0.5                 | 23.039                      | 4.29%                                      |
| 46.07              | 1                   | 22.092                      | 8.76%                                      |
| 46.07              | 1.5                 | 21.183                      | 13.43%                                     |
| 46.07              | 2                   | 20.312                      | 18.29%                                     |
| 46.07              | 2.5                 | 19.476                      | 23.37%                                     |
| 46.07              | 3                   | 18.675                      | 28.66%                                     |
| 46.07              | 3.5                 | 17.907                      | 34.18%                                     |
| 46.07              | 4                   | 17.171                      | 39.93%                                     |
| 46.07              | 4.5                 | 16.464                      | 45.94%                                     |
| 46.07              | 5                   | 15.787                      | 52.20%                                     |
| 46.07              | 5.5                 | 15.138                      | 58.72%                                     |
| 46.07              | 6                   | 14.515                      | 65.53%                                     |
| 46.07              | 6.5                 | 13.918                      | 72.63%                                     |
| 46.07              | 7                   | 13.346                      | 80.04%                                     |
| 46.07              | 7.5                 | 12.797                      | 87.76%                                     |
| 46.07              | 8                   | 12.271                      | 95.81%                                     |



Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures

Modèle BRRC

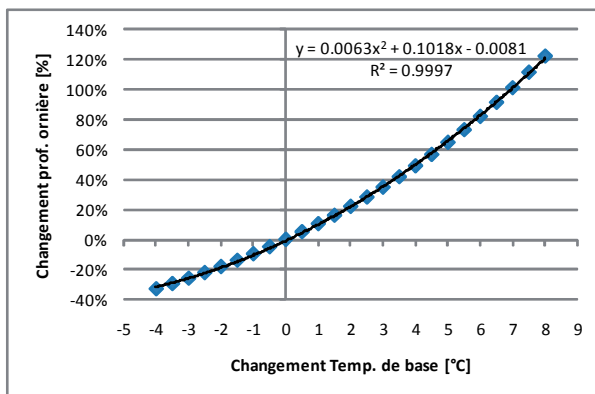
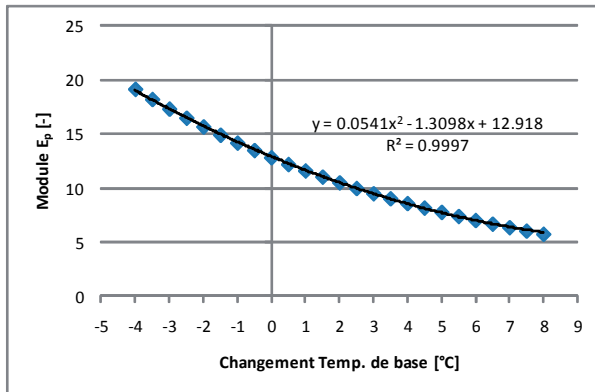
Exemple - Route Principale à Delémont

Hypothèses : Enrobé de type AC 16 => Calcul des modules à l'aide du logiciel PAMINA

|                             |       |                       |                                       |
|-----------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| V                           | 51    | [km/h]                | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>max</sub>            | 46.38 | [°C]                  | (selon méthode Angst)                 |
| v                           | 0.74  | [%]                   | (selon rapport LAVOC)                 |
| V <sub>A</sub> (pierre)     | 58.6  | [%]                   | (>2mm ; selon rapport LAVOC)          |
| V <sub>A</sub> (sable)      | 32.5  | [%]                   | (>0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| V <sub>A</sub> (filler)     | 8.9   | [%]                   | (<0.063mm ; selon rapport LAVOC)      |
| conc                        | 100   | [%]                   | (matériaux concassés)                 |
| V <sub>I</sub>              | 5.73  | [%]                   | (sur granulats ; selon rapport LAVOC) |
| pen                         | 64    | [10 <sup>-1</sup> mm] | (selon rapport LAVOC)                 |
| T <sub>A&amp;B</sub> (=TRB) | 51.2  | [°C]                  | (selon rapport LAVOC)                 |

| E <sub>p</sub> [Mpa] : | Vitesse V [km/h] | Température T [°C] |       |       |       |       |      |      |
|------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                        |                  | -20                | -10   | 0     | 10    | 20    | 30   | 40   |
|                        | 10               | 735.5              | 589.9 | 413.2 | 248.9 | 100.7 | 34.4 | 12.6 |
|                        | 20               | 750.9              | 624.9 | 448.2 | 283.9 | 130.9 | 44.8 | 16.4 |
|                        | 30               | 758.8              | 644.6 | 468.7 | 304.4 | 151.4 | 52.2 | 19.1 |
|                        | 40               | 764                | 657.4 | 483.2 | 318.9 | 165.9 | 58.2 | 21.3 |
|                        | 50               | 767.7              | 666.8 | 494.5 | 330.2 | 177.2 | 63.4 | 23.2 |
|                        | 51               | 768.2              | 667.7 | 495.5 | 331.2 | 178.5 | 65.5 | 24.0 |
|                        | 60               | 770.6              | 674   | 503.7 | 339.4 | 186.4 | 67.9 | 24.9 |
|                        | 70               | 773                | 679.9 | 511.5 | 347.2 | 194.2 | 72   | 26.4 |
|                        | 80               | 775                | 684.9 | 518.2 | 353.9 | 200.9 | 75.7 | 27.7 |
|                        | 90               | 776.7              | 689.1 | 524.1 | 359.9 | 206.8 | 79.2 | 29   |
|                        | 100              | 778.2              | 692.8 | 529.5 | 365.2 | 212.2 | 82.4 | 30.2 |

| Température T [°C] | Chgmt temp. ΔT [°C] | Module E <sub>p</sub> [MPa] | Chgmt prof. ornière Δu <sub>perm</sub> [%] |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| 46.38              | -4                  | 19.169                      | -32.97%                                    |
| 46.38              | -3.5                | 18.234                      | -29.53%                                    |
| 46.38              | -3                  | 17.345                      | -25.92%                                    |
| 46.38              | -2.5                | 16.499                      | -22.12%                                    |
| 46.38              | -2                  | 15.694                      | -18.13%                                    |
| 46.38              | -1.5                | 14.929                      | -13.93%                                    |
| 46.38              | -1                  | 14.201                      | -9.52%                                     |
| 46.38              | -0.5                | 13.508                      | -4.88%                                     |
| 46.38              | 0                   | 12.849                      | 0.00%                                      |
| 46.38              | 0.5                 | 12.223                      | 5.13%                                      |
| 46.38              | 1                   | 11.626                      | 10.52%                                     |
| 46.38              | 1.5                 | 11.059                      | 16.18%                                     |
| 46.38              | 2                   | 10.520                      | 22.14%                                     |
| 46.38              | 2.5                 | 10.007                      | 28.40%                                     |
| 46.38              | 3                   | 9.519                       | 34.99%                                     |
| 46.38              | 3.5                 | 9.055                       | 41.91%                                     |
| 46.38              | 4                   | 8.613                       | 49.18%                                     |
| 46.38              | 4.5                 | 8.193                       | 56.83%                                     |
| 46.38              | 5                   | 7.793                       | 64.87%                                     |
| 46.38              | 5.5                 | 7.413                       | 73.33%                                     |
| 46.38              | 6                   | 7.052                       | 82.21%                                     |
| 46.38              | 6.5                 | 6.708                       | 91.55%                                     |
| 46.38              | 7                   | 6.381                       | 101.38%                                    |
| 46.38              | 7.5                 | 6.070                       | 111.70%                                    |
| 46.38              | 8                   | 5.774                       | 122.55%                                    |



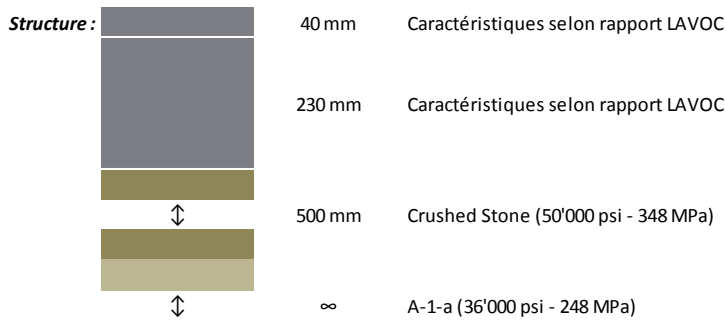
10.1.3. Modèle de comportement M-E PDG [25]

**Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures**  
**Modèle M-E PDG**  
**Exemple - Autoroute à Lonay**

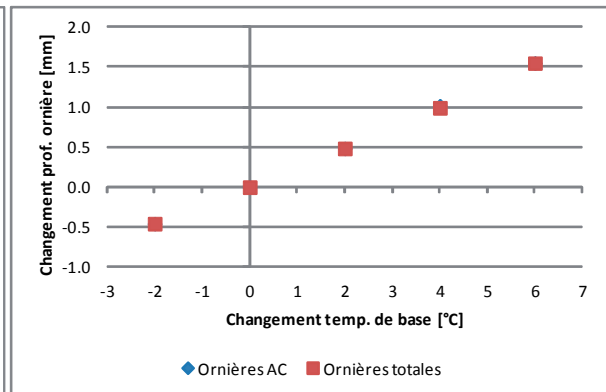
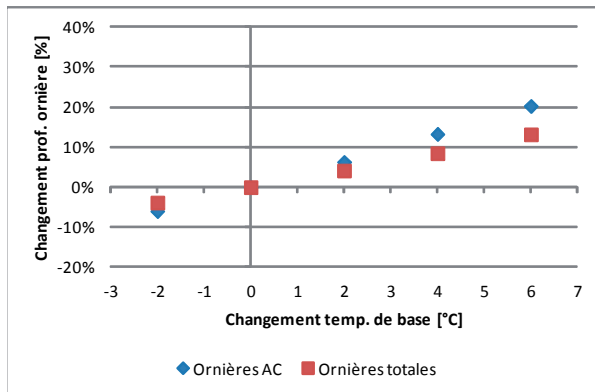
**Hypothèses :** selon rapport LAVOC et valeurs par défaut M-E PDG

données météorologiques de la station Pully (2000-2010)

|                                  |        |         |                                |
|----------------------------------|--------|---------|--------------------------------|
| Durée de vie                     | 19     | [ans]   | (selon rapport LAVOC)          |
| TJM <sub>Initial</sub>           | 34'450 | [vhc/j] | (selon rapport LAVOC)          |
| %PL                              | 6.0    | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Accroiss. Trafic                 | 4.03   | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Courbe de variation annuelle     | SC     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Courbe de variation hebdomadaire | S1     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Distribution PL                  | TTC 13 | [-]     | (selon recommandations AASHTO) |
| v                                | 90     | [km/h]  | (selon rapport LAVOC)          |



| Chgmt temp. de base Δd [°C] | Prof. ornière AC [mm] | Chgmt prof. ornière AC [%] | Chgmt prof. ornière AC [mm] | Prof. ornière tot [mm] | Chgmt prof. ornière tot [%] | Chgmt prof. ornière tot [mm] |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| -2.0                        | 7.19                  | -5.98%                     | -0.46                       | 11.28                  | -3.90%                      | -0.46                        |
| 0.0                         | 7.65                  | 0.00%                      | 0.00                        | 11.73                  | 0.00%                       | 0.00                         |
| 2.0                         | 8.13                  | 6.31%                      | 0.48                        | 12.22                  | 4.11%                       | 0.48                         |
| 4.0                         | 8.66                  | 13.29%                     | 1.02                        | 12.73                  | 8.44%                       | 0.99                         |
| 6.0                         | 9.19                  | 20.27%                     | 1.55                        | 13.28                  | 13.20%                      | 1.55                         |





**Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures**

**Modèle M-E PDG**

**Exemple - Route principale à Kleingurmels**

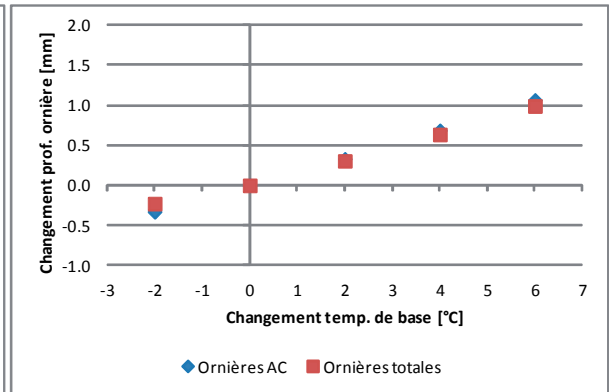
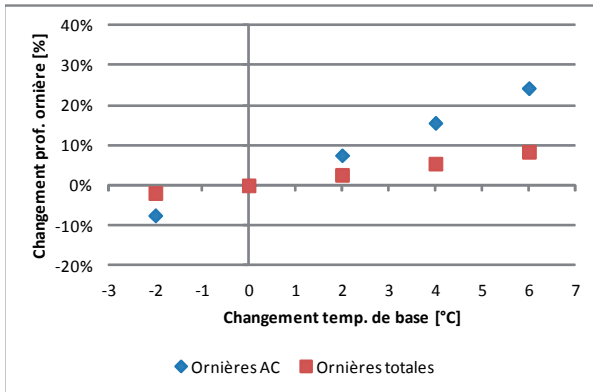
**Hypothèses :** selon rapport LAVOC et valeurs par défaut M-E PDG

données météorologiques des stations Mühleberg et Payerne (2000-2010)

|                                  |        |         |                                |
|----------------------------------|--------|---------|--------------------------------|
| Durée de vie                     | 24     | [ans]   | (selon rapport LAVOC)          |
| TJM <sub>Initial</sub>           | 3252   | [vhc/j] | (selon rapport LAVOC)          |
| %PL                              | 8.0    | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Accroiss. Trafic                 | 4.58   | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Courbe de variation annuelle     | SC     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Courbe de variation hebdomadaire | S1     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Distribution PL                  | TTC 14 | [-]     | (selon recommandations AASHTO) |
| v                                | 53     | [km/h]  | (selon rapport LAVOC)          |



| Chgmt temp. de base Δd [°C] | Prof. ornière AC [mm] | Chgmt prof. ornière AC [%] | Chgmt prof. ornière AC [mm] | Prof. ornière tot [mm] | Chgmt prof. ornière tot [%] | Chgmt prof. ornière tot [mm] |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| -2.0                        | 4.06                  | -7.51%                     | -0.33                       | 11.56                  | -1.94%                      | -0.23                        |
| 0.0                         | 4.39                  | 0.00%                      | 0.00                        | 11.79                  | 0.00%                       | 0.00                         |
| 2.0                         | 4.72                  | 7.51%                      | 0.33                        | 12.09                  | 2.59%                       | 0.30                         |
| 4.0                         | 5.08                  | 15.61%                     | 0.69                        | 12.42                  | 5.39%                       | 0.64                         |
| 6.0                         | 5.46                  | 24.28%                     | 1.07                        | 12.78                  | 8.41%                       | 0.99                         |



**Comparaison de différents modèles de comportement - Influence des températures**

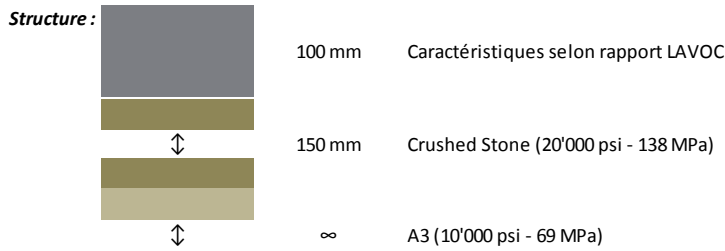
**Modèle M-E PDG**

**Exemple - Route principale à Delémont**

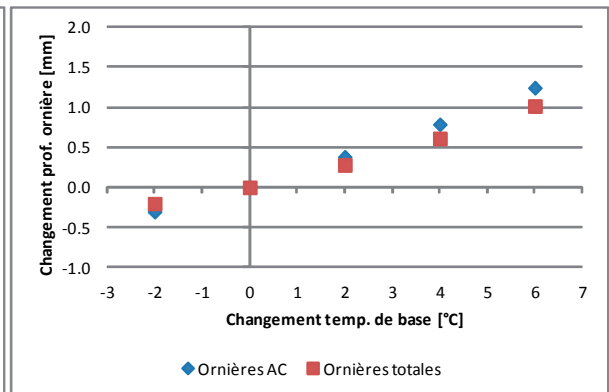
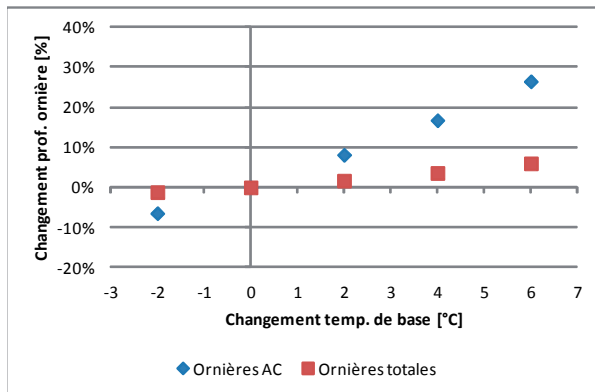
**Hypothèses :** selon rapport LAVOC et valeurs par défaut M-E PDG

données météorologiques stations Delémont, Grenchen et Basel/Binningen (2000-2010)

|                                  |        |         |                                |
|----------------------------------|--------|---------|--------------------------------|
| Durée de vie                     | 21     | [ans]   | (selon rapport LAVOC)          |
| TJM <sub>Initial</sub>           | 11'582 | [vhc/j] | (selon rapport LAVOC)          |
| %PL                              | 3.2    | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Accroiss. Trafic                 | 3.38   | [%]     | (selon rapport LAVOC)          |
| Courbe de variation annuelle     | SC     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Courbe de variation hebdomadaire | S1     | [-]     | (selon norme SN 640005b)       |
| Distribution PL                  | TTC 14 | [-]     | (selon recommandations AASHTO) |
| v                                | 51     | [km/h]  | (selon rapport LAVOC)          |



| Chgmt temp. de base Δd [°C] | Prof. ornière AC [mm] | Chgmt prof. ornière AC [%] | Chgmt prof. ornière AC [mm] | Prof. ornière tot [mm] | Chgmt prof. ornière tot [%] | Chgmt prof. ornière tot [mm] |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| -2.0                        | 4.39                  | -6.49%                     | -0.30                       | 16.79                  | -1.20%                      | -0.20                        |
| 0.0                         | 4.70                  | 0.00%                      | 0.00                        | 16.99                  | 0.00%                       | 0.00                         |
| 2.0                         | 5.08                  | 8.11%                      | 0.38                        | 17.27                  | 1.64%                       | 0.28                         |
| 4.0                         | 5.49                  | 16.76%                     | 0.79                        | 17.60                  | 3.59%                       | 0.61                         |
| 6.0                         | 5.94                  | 26.49%                     | 1.24                        | 18.01                  | 5.98%                       | 1.02                         |



## 10.2. Dimensionnement au gel

### 10.2.1. Profondeur de pénétration du gel – Degré de gélivité G3

#### Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

##### Dimensionnement au gel

##### Profondeur de pénétration du gel

##### Sol G3 ; RI = 0°C·jour

**Hypothèses :** Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                             | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                            | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                             | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                             | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                            | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                             | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                             | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                            | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                             | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 184               | 127      | 223   | 149    | 140     | 152  | 223     | 152   | 90     |
| c. terme - B1                                    | 166               | 110      | 135   | 132    | 122     | 135  | 200     | 135   | 77     |
| c. terme - A1B                                   | 162               | 109      | 132   | 129    | 118     | 132  | 200     | 135   | 73     |
| c. terme - A2                                    | 165               | 110      | 133   | 131    | 120     | 133  | 200     | 133   | 72     |
| m. terme - B1                                    | 158               | 102      | 125   | 124    | 110     | 127  | 190     | 127   | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 148               | 92       | 114   | 112    | 101     | 117  | 178     | 117   | <70    |
| m. terme - A2                                    | 149               | 97       | 117   | 113    | 102     | 118  | 180     | 118   | <70    |
| l. terme - B1                                    | 150               | 98       | 121   | 114    | 103     | 120  | 182     | 121   | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 135               | 83       | 102   | 99     | 90      | 102  | 165     | 108   | <70    |
| l. terme - A2                                    | 131               | 82       | 101   | 97     | 88      | 100  | 160     | 100   | <70    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

### Dimensionnement au gel

#### Profondeur de pénétration du gel

**Sol G3 ; RI = 100°C·jour**

**Hypothèses :** Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 486               | 158      | 279   | 263    | 218     | 286  | 778     | 285   | 16     |
| c. terme - B1                             | 368               | 88       | 192   | 178    | 137     | 202  | 606     | 204   | 0      |
| c. terme - A1B                            | 350               | 78       | 178   | 167    | 120     | 180  | 579     | 193   | 0      |
| c. terme - A2                             | 359               | 88       | 184   | 177    | 125     | 189  | 590     | 189   | 0      |
| m. terme - B1                             | 311               | 63       | 151   | 142    | 88      | 156  | 536     | 157   | 0      |
| m. terme - A1B                            | 260               | 20       | 102   | 92     | 50      | 111  | 450     | 111   | 0      |
| m. terme - A2                             | 264               | 31       | 111   | 99     | 55      | 119  | 457     | 120   | 0      |
| l. terme - B1                             | 272               | 36       | 128   | 105    | 63      | 125  | 473     | 128   | 0      |
| l. terme - A1B                            | 201               | 0        | 61    | 44     | 14      | 61   | 357     | 65    | 0      |
| l. terme - A2                             | 178               | 0        | 50    | 34     | 6       | 48   | 329     | 49    | 0      |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 170               | 102      | 131   | 129    | 118     | 134  | 210     | 134   | <70    |
| c. terme - B1                                    | 149               | 82       | 112   | 109    | 98      | 114  | 188     | 114   | <70    |
| c. terme - A1B                                   | 145               | 78       | 109   | 108    | 94      | 109  | 183     | 112   | <70    |
| c. terme - A2                                    | 147               | 82       | 110   | 109    | 95      | 111  | 184     | 111   | <70    |
| m. terme - B1                                    | 139               | 73       | 101   | 99     | 82      | 102  | 177     | 102   | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 127               | <70      | 87    | 83     | <70     | 89   | 163     | 89    | <70    |
| m. terme - A2                                    | 129               | <70      | 89    | 85     | 72      | 94   | 165     | 93    | <70    |
| l. terme - B1                                    | 130               | <70      | 97    | 88     | 73      | 95   | 168     | 97    | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 114               | <70      | 73    | <70    | <70     | 73   | 147     | 73    | <70    |
| l. terme - A2                                    | 109               | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 143     | <70   | <70    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

### Dimensionnement au gel

#### Profondeur de pénétration du gel

**Sol G3 ; RI = 200°C·jour**

**Hypothèses :** Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 386               | 58       | 179   | 163    | 118     | 186  | 678     | 185   | 0      |
| c. terme - B1                             | 268               | 0        | 92    | 78     | 37      | 102  | 506     | 104   | 0      |
| c. terme - A1B                            | 250               | 0        | 78    | 67     | 20      | 80   | 479     | 93    | 0      |
| c. terme - A2                             | 259               | 0        | 84    | 77     | 25      | 89   | 490     | 89    | 0      |
| m. terme - B1                             | 211               | 0        | 51    | 42     | 0       | 56   | 436     | 57    | 0      |
| m. terme - A1B                            | 160               | 0        | 2     | 0      | 0       | 11   | 350     | 11    | 0      |
| m. terme - A2                             | 164               | 0        | 11    | 0      | 0       | 19   | 357     | 20    | 0      |
| l. terme - B1                             | 172               | 0        | 28    | 0      | 0       | 25   | 373     | 28    | 0      |
| l. terme - A1B                            | 101               | 0        | 0     | 0      | 0       | 0    | 257     | 0     | 0      |
| l. terme - A2                             | 78                | 0        | 0     | 0      | 0       | 0    | 229     | 0     | 0      |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 153               | 73       | 109   | 103    | 94      | 110  | 200     | 110   | <70    |
| c. terme - B1                                    | 129               | <70      | 83    | 78     | <70     | 87   | 172     | 87    | <70    |
| c. terme - A1B                                   | 125               | <70      | 78    | 73     | <70     | 78   | 168     | 83    | <70    |
| c. terme - A2                                    | 127               | <70      | 81    | 78     | <70     | 82   | 170     | 82    | <70    |
| m. terme - B1                                    | 117               | <70      | <70   | <70    | <70     | 72   | 160     | 72    | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 101               | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 145     | <70   | <70    |
| m. terme - A2                                    | 102               | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 147     | <70   | <70    |
| l. terme - B1                                    | 106               | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 150     | <70   | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 87                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 217     | <70   | <70    |
| l. terme - A2                                    | 78                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 121     | <70   | <70    |

## 10.2.2. Profondeur de pénétration du gel – Degré de gélivité G4

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Profondeur de pénétration du gel

## Sol G4 ; RI = 0°C·jour

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                             | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                            | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                             | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                             | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                            | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                             | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                             | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                            | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                             | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 139               | 103      | 118   | 117    | 110     | 119  | 165     | 119   | 78     |
| c. terme - B1                                    | 128               | 92       | 108   | 107    | 99      | 109  | 150     | 109   | <70    |
| c. terme - A1B                                   | 125               | 90       | 107   | 104    | 98      | 107  | 148     | 108   | <70    |
| c. terme - A2                                    | 126               | 92       | 107   | 107    | 98      | 108  | 149     | 108   | <70    |
| m. terme - B1                                    | 121               | 88       | 101   | 100    | 92      | 103  | 143     | 103   | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 116               | 79       | 94    | 93     | 84      | 96   | 135     | 96    | <70    |
| m. terme - A2                                    | 117               | 81       | 96    | 94     | 85      | 98   | 136     | 98    | <70    |
| l. terme - B1                                    | 118               | 82       | 99    | 96     | 87      | 98   | 138     | 99    | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 109               | 72       | 87    | 83     | 78      | 87   | 127     | 88    | <70    |
| l. terme - A2                                    | 107               | 72       | 84    | 82     | 76      | 84   | 123     | 84    | <70    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

### Dimensionnement au gel

#### Profondeur de pénétration du gel

**Sol G4 ; RI = 100°C·jour**

**Hypothèses :** Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 486               | 158      | 279   | 263    | 218     | 286  | 778     | 285   | 16     |
| c. terme - B1                             | 368               | 88       | 192   | 178    | 137     | 202  | 606     | 204   | 0      |
| c. terme - A1B                            | 350               | 78       | 178   | 167    | 120     | 180  | 579     | 193   | 0      |
| c. terme - A2                             | 359               | 88       | 184   | 177    | 125     | 189  | 590     | 189   | 0      |
| m. terme - B1                             | 311               | 63       | 151   | 142    | 88      | 156  | 536     | 157   | 0      |
| m. terme - A1B                            | 260               | 20       | 102   | 92     | 50      | 111  | 450     | 111   | 0      |
| m. terme - A2                             | 264               | 31       | 111   | 99     | 55      | 119  | 457     | 120   | 0      |
| l. terme - B1                             | 272               | 36       | 128   | 105    | 63      | 125  | 473     | 128   | 0      |
| l. terme - A1B                            | 201               | 0        | 61    | 44     | 14      | 61   | 357     | 65    | 0      |
| l. terme - A2                             | 178               | 0        | 50    | 34     | 6       | 48   | 329     | 49    | 0      |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 129               | 86       | 107   | 104    | 98      | 108  | 156     | 108   | <70    |
| c. terme - B1                                    | 117               | 72       | 93    | 90     | 82      | 94   | 142     | 94    | <70    |
| c. terme - A1B                                   | 114               | 70       | 90    | 88     | 79      | 90   | 138     | 93    | <70    |
| c. terme - A2                                    | 115               | 72       | 92    | 90     | 80      | 93   | 140     | 93    | <70    |
| m. terme - B1                                    | 110               | <70      | 84    | 83     | 72      | 85   | 133     | 85    | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 103               | <70      | 75    | 72     | <70     | 77   | 127     | 77    | <70    |
| m. terme - A2                                    | 104               | <70      | 77    | 74     | <70     | 79   | 127     | 79    | <70    |
| l. terme - B1                                    | 106               | <70      | 81    | 75     | <70     | 80   | 128     | 81    | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 94                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 115     | <70   | <70    |
| l. terme - A2                                    | 90                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 111     | <70   | <70    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

### Dimensionnement au gel

#### Profondeur de pénétration du gel

**Sol G4 ; RI = 200°C·jour**

**Hypothèses :** Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Indice de gel de l'air significatif FI |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                               | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                  | 586               | 258      | 379   | 363    | 318     | 386  | 878     | 385   | 116    |
| c. terme - B1                          | 468               | 188      | 292   | 278    | 237     | 302  | 706     | 304   | 68     |
| c. terme - A1B                         | 450               | 178      | 278   | 267    | 220     | 280  | 679     | 293   | 61     |
| c. terme - A2                          | 459               | 188      | 284   | 277    | 225     | 289  | 690     | 289   | 59     |
| m. terme - B1                          | 411               | 163      | 251   | 242    | 188     | 256  | 636     | 257   | 48     |
| m. terme - A1B                         | 360               | 120      | 202   | 192    | 150     | 211  | 550     | 211   | 31     |
| m. terme - A2                          | 364               | 131      | 211   | 199    | 155     | 219  | 557     | 220   | 32     |
| l. terme - B1                          | 372               | 136      | 228   | 205    | 163     | 225  | 573     | 228   | 35     |
| l. terme - A1B                         | 301               | 90       | 161   | 144    | 114     | 161  | 457     | 165   | 19     |
| l. terme - A2                          | 278               | 88       | 150   | 134    | 106     | 148  | 429     | 149   | 20     |

| Indice de gel de la route FI <sub>s</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 386               | 58       | 179   | 163    | 118     | 186  | 678     | 185   | 0      |
| c. terme - B1                             | 268               | 0        | 92    | 78     | 37      | 102  | 506     | 104   | 0      |
| c. terme - A1B                            | 250               | 0        | 78    | 67     | 20      | 80   | 479     | 93    | 0      |
| c. terme - A2                             | 259               | 0        | 84    | 77     | 25      | 89   | 490     | 89    | 0      |
| m. terme - B1                             | 211               | 0        | 51    | 42     | 0       | 56   | 436     | 57    | 0      |
| m. terme - A1B                            | 160               | 0        | 2     | 0      | 0       | 11   | 350     | 11    | 0      |
| m. terme - A2                             | 164               | 0        | 11    | 0      | 0       | 19   | 357     | 20    | 0      |
| l. terme - B1                             | 172               | 0        | 28    | 5      | 0       | 25   | 373     | 28    | 0      |
| l. terme - A1B                            | 101               | 0        | 0     | 0      | 0       | 0    | 257     | 0     | 0      |
| l. terme - A2                             | 78                | 0        | 0     | 0      | 0       | 0    | 229     | 0     | 0      |

| Profondeur de pénétration du gel X <sub>30</sub> |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|--|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario   | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1  | 119               | <70      | 90    | 88     | 79      | 92   | 148     | 92    | <70    |
| c. terme - B1                                    | 104               | <70      | 72    | 70     | <70     | 75   | 131     | 75    | <70    |
| c. terme - A1B                                   | 101               | <70      | 70    | <70    | <70     | 70   | 128     | 72    | <70    |
| c. terme - A2                                    | 103               | <70      | 71    | <70    | <70     | 72   | 129     | 72    | <70    |
| m. terme - B1                                    | 96                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 124     | <70   | <70    |
| m. terme - A1B                                   | 87                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 114     | <70   | <70    |
| m. terme - A2                                    | 88                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 115     | <70   | <70    |
| l. terme - B1                                    | 89                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 118     | <70   | <70    |
| l. terme - A1B                                   | 75                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 103     | <70   | <70    |
| l. terme - A2                                    | 70                | <70      | <70   | <70    | <70     | <70  | 99      | <70   | <70    |



## 10.2.3. Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel– Degré de gélivité G3

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G3 ; RI = 0°C·jour ;  $\rho_d = 2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 13%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.45) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 83                | 57       | 100   | 67     | 63      | 68   | 100     | 68    | <60    |
| c. terme - B1                             | 75                | <60      | 61    | <60    | <60     | 61   | 90      | 61    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 73                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 90      | 61    | <60    |
| c. terme - A2                             | 74                | <60      | 60    | <60    | <60     | 60   | 90      | 60    | <60    |
| m. terme - B1                             | 71                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 86      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | 67                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 80      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | 67                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | 68                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 82      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | 61                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 74      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 72      | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 101               | 70       | 123   | 82     | 77      | 84   | 123     | 84    | <60    |
| c. terme - B1                             | 91                | 61       | 74    | 73     | 67      | 74   | 110     | 74    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 89                | 60       | 73    | 71     | 65      | 73   | 110     | 74    | <60    |
| c. terme - A2                             | 91                | 61       | 73    | 72     | 66      | 73   | 110     | 73    | <60    |
| m. terme - B1                             | 87                | <60      | 69    | 68     | 61      | 70   | 105     | 70    | <60    |
| m. terme - A1B                            | 81                | <60      | 63    | 62     | <60     | 64   | 98      | 64    | <60    |
| m. terme - A2                             | 82                | <60      | 64    | 62     | <60     | 65   | 99      | 65    | <60    |
| l. terme - B1                             | 83                | <60      | 67    | 63     | <60     | 66   | 100     | 67    | <60    |
| l. terme - A1B                            | 74                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 91      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | 72                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 88      | <60   | <60    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G3 ; RI = 100°C·jour ;  $\rho_d = 2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 13%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.45) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 77                | <60      | <60   | <60    | <60     | 60   | 95      | 60    | <60    |
| c. terme - B1                             | 67                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 85      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | 65                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 82      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | 66                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | 63                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 80      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 73      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 74      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 76      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 66      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 64      | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 94                | <60      | 72    | 71     | 65      | 74   | 116     | 74    | <60    |
| c. terme - B1                             | 82                | <60      | 62    | 60     | <60     | 63   | 103     | 63    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 80                | <60      | 60    | <60    | <60     | 60   | 101     | 62    | <60    |
| c. terme - A2                             | 81                | <60      | 61    | 60     | <60     | 61   | 101     | 61    | <60    |
| m. terme - B1                             | 76                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 97      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | 70                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 90      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | 71                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 91      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | 72                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 92      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | 63                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | 60                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 79      | <60   | <60    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G3 ; RI = 200°C·jour ;  $\rho_d = 2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 13%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.45) |                  |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chau-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 69               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 90      | <60   | <60    |
| c. terme - B1                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 77      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 76      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 77      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 72      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 65      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 66      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 68      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 57      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | <60     | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                  |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chau-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 84               | <60      | 60    | <60    | <60     | 61   | 110     | 61    | <60    |
| c. terme - B1                             | 71               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 95      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | 69               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 92      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | 70               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 94      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | 64               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 88      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 80      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 67      | <60   | <60    |

## 10.2.4. Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel – Degré de gélivité G4

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G4 ; RI = 0°C·jour ;  $\rho_d = 1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 22%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                  |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chau-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 76               | <60      | 65    | 64     | 61      | 65   | 91      | 65    | <60    |
| c. terme - B1                             | 70               | <60      | <60   | <60    | <60     | 60   | 83      | 60    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 69               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | 69               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 82      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | 67               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 79      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | 64               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 74      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | 64               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 75      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | 65               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 76      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | 60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60              | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 68      | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.65) |                  |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chau-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 90               | 67       | 77    | 76     | 72      | 77   | 107     | 77    | <60    |
| c. terme - B1                             | 83               | 60       | 70    | 70     | 64      | 71   | 98      | 71    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 81               | <60      | 70    | 68     | 64      | 70   | 96      | 70    | <60    |
| c. terme - A2                             | 82               | 60       | 70    | 70     | 64      | 70   | 97      | 70    | <60    |
| m. terme - B1                             | 79               | <60      | 66    | 65     | 60      | 67   | 93      | 67    | <60    |
| m. terme - A1B                            | 75               | <60      | 61    | 60     | <60     | 62   | 88      | 62    | <60    |
| m. terme - A2                             | 76               | <60      | 62    | 61     | <60     | 64   | 88      | 64    | <60    |
| l. terme - B1                             | 77               | <60      | 64    | 62     | <60     | 64   | 90      | 64    | <60    |
| l. terme - A1B                            | 71               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | 70               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 80      | <60   | <60    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G4 ; RI = 100°C·jour ;  $\rho_d = 1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 22%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 71                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 86      | <60   | <60    |
| c. terme - B1                             | 64                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 78      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | 63                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 76      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | 63                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 77      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | 61                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 73      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 63      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 61      | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.65) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 84                | <60      | 70    | 68     | 64      | 70   | 101     | 70    | <60    |
| c. terme - B1                             | 76                | <60      | 60    | <60    | <60     | 61   | 92      | 61    | <60    |
| c. terme - A1B                            | 74                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 90      | 60    | <60    |
| c. terme - A2                             | 75                | <60      | 60    | <60    | <60     | 60   | 91      | 60    | <60    |
| m. terme - B1                             | 72                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 86      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | 67                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | 68                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | 69                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | 61                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 75      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 72      | <60   | <60    |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Dimensionnement au gel

## Epaisseurs nécessaires des chaussées contre le gel

Sol G4 ; RI = 200°C·jour ;  $\rho_d = 1.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  ; w = 22%

Hypothèses : Méthode de calcul selon SN 670 140b

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.55) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 65                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| c. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 72      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 70      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 71      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 68      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 63      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 63      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 65      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | <60     | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | <60     | <60   | <60    |

| Epaisseur nécessaire minimale ds (f=0.65) |                   |          |       |        |         |      |         |       |        |
|---|-------------------|----------|-------|--------|---------|------|---------|-------|--------|
| Scénario                                  | La Chaux-de-Fonds | Lausanne | Berne | Zurich | Altdorf | Sion | Simplon | Coire | Lugano |
| réf.1                                     | 77                | <60      | <60   | <60    | <60     | 60   | 96      | 60    | <60    |
| c. terme - B1                             | 68                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 85      | <60   | <60    |
| c. terme - A1B                            | 66                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 83      | <60   | <60    |
| c. terme - A2                             | 67                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 84      | <60   | <60    |
| m. terme - B1                             | 62                | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 81      | <60   | <60    |
| m. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 74      | <60   | <60    |
| m. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 75      | <60   | <60    |
| l. terme - B1                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 77      | <60   | <60    |
| l. terme - A1B                            | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 67      | <60   | <60    |
| l. terme - A2                             | <60               | <60      | <60   | <60    | <60     | <60  | 64      | <60   | <60    |

## 10.3. Résultats DARWin-ME – Impact du changement climatique

### 10.3.1. Aperçu des hypothèses et paramètres d'évaluation

#### 10.3.1.1. Paramètres généraux

| Modèle DARWin-ME                          |  |             |        |
|---|--|-------------|--------|
| Modélisation                              |  |             |        |
| Paramètres généraux - Revêtements souples |  |             |        |
| <b>Hypothèses :</b>                       | Durée de vie   | 20          | [ans]  |
|   | Construction   | Mai         | [mois] |
|   | Fondation/Grave  |             |        |
|   | Construction   | Mai         | [mois] |
|   | Revêtement   |             |        |
|   | Ouverture trafic   | Mai         | [mois] |
|   | Type revêtement  | Flexible    | [-]    |
| <b>Horizons d'analyse :</b>               | 1990-2010  | référence   |        |
|   | 2020-2040  | court terme |        |
|   | 2050-2070  | moyen terme |        |
|   | 2080-2100  | long terme  |        |
| <b>Paramètres d'analyse :</b>             | Déformation permanente - Total   |             | [mm]   |
|   | Déformation permanente - AC  |             | [mm]   |
|   | Fissuration du haut vers le bas<br>(fissuration longitudinale)         |             | [m/km] |
|   | Fissuration du bas vers le haut<br>(faiencage)                         |             | [%]    |
|   | Fissuration dans les couches stabilisées<br>(revêtements semi-rigides) |             | [%]    |
|   | Fissuration thermique  |             | [m/km] |
|   | IRI  |             | [m/km] |
| <b>Paramètres initiaux DARWin-ME :</b>    | IRI  | 1           | [m/km] |
| <b>Paramètres probabilistes :</b>         | Performances moyennes  | 50          | [%]    |

## 10.3.1.2. Paramètres météorologiques

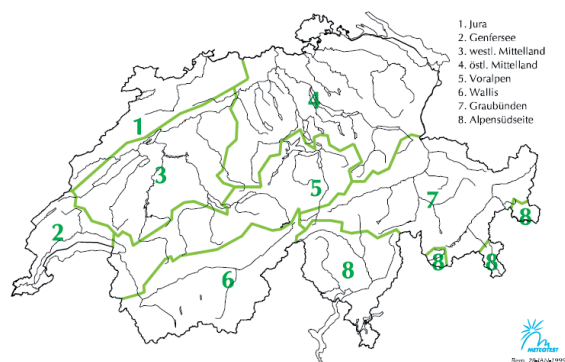
## Modèle DARWin-ME

## Modélisation

## Paramètres météorologiques

|                     |                          |     |     |                             |
|---------------------|--------------------------|-----|-----|-----------------------------|
| <b>Hypothèses :</b> | Profondeur nappe phréat. | 3.6 | [m] |                             |
|                     | Régions clim.            | 8   | [-] | (selon rapport OFROU n°473) |

| <b>Régions climatiques :</b><br>(selon Meteonorm 7.0) | Région           | Ville             | Latitude N | Longitude E | Altitude [m] |
|---|------------------|-------------------|------------|-------------|--------------|
|   | Jura             | La Chaux-de-Fonds | 47.1015    | 6.82477     | 994          |
|   | Bassin lémanique | Lausanne          | 46.5200    | 6.63327     | 526          |
|   | Plateau (ouest)  | Berne             | 46.9484    | 7.43995     | 540          |
|   | Plateau (est)    | Zurich            | 47.3695    | 8.53885     | 413          |
|   | Préalpes         | Altdorf           | 46.8809    | 8.643       | 459          |
|   | Valais 1         | Sion              | 46.2323    | 7.36086     | 518          |
|   | Valais 2         | Simplon           | 46.1956    | 8.05655     | 1476         |
|   | Grisons          | Coire             | 46.8511    | 9.52758     | 590          |
|   | Sud des Alpes    | Lugano            | 46.0045    | 8.95034     | 273          |



|                                     |                   |              |
|-------------------------------------|-------------------|--------------|
| <b>Paramètres météorologiques :</b> | Date              | [YYYYMMDDHH] |
|                                     | Température       | [°C]         |
|                                     | Vitesse vent      | [km/h]       |
|                                     | Ensoleillement    | [%]          |
|                                     | Précipitations    | [mm]         |
|                                     | Humidité relative | [%]          |

**Modèle DARWin-ME**  
**Modélisation**  
**Paramètres météorologiques**

**Scénarios climatiques :**  
*(selon IPCC)*

B1 intégré et écologique

A1B intégré (balance énergies fossiles - non-fossiles)

A2 hétérogène

**Horizons d'analyse :**

1990-2010 référence

2020-2040 court terme

2050-2070 moyen terme

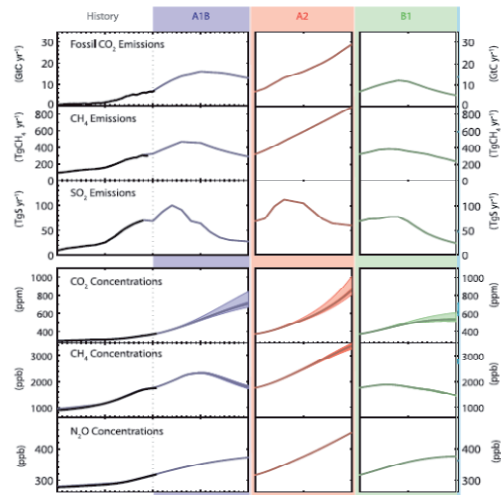
2080-2100 long terme

**Modèle temp. Meteonorm 7.0 :**

standard moyenne 10 ans

extrême extrême 10 ans

**Modélisation météo :**



| référence |                  | court terme |               | moyen terme |               | long terme |               |
|-----------|------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|
| Année     | Meteonorm 7.0    | Année       | Meteonorm 7.0 | Année       | Meteonorm 7.0 | Année      | Meteonorm 7.0 |
| 1990      | 1961-1990/stand. | 2020        | 2020/stand.   | 2050        | 2050/stand.   | 2080       | 2080/stand.   |
| 1991      | 1961-1990/stand. | 2021        | 2020/stand.   | 2051        | 2050/stand.   | 2081       | 2080/stand.   |
| 1992      | 1961-1990/stand. | 2022        | 2020/extr.    | 2052        | 2050/extr.    | 2082       | 2080/extr.    |
| 1993      | 1961-1990/stand. | 2023        | 2020/stand.   | 2053        | 2050/stand.   | 2083       | 2080/stand.   |
| 1994      | 1961-1990/stand. | 2024        | 2020/stand.   | 2054        | 2050/stand.   | 2084       | 2080/stand.   |
| 1995      | 1961-1990/stand. | 2025        | 2020/stand.   | 2055        | 2050/stand.   | 2085       | 2080/stand.   |
| 1996      | 1961-1990/stand. | 2026        | 2020/stand.   | 2056        | 2050/stand.   | 2086       | 2080/stand.   |
| 1997      | 1961-1990/stand. | 2027        | 2020/extr.    | 2057        | 2050/extr.    | 2087       | 2080/extr.    |
| 1998      | 1961-1990/stand. | 2028        | 2020/stand.   | 2058        | 2050/stand.   | 2088       | 2080/stand.   |
| 1999      | 1961-1990/stand. | 2029        | 2020/stand.   | 2059        | 2050/stand.   | 2089       | 2080/stand.   |
| 2000      | 2000-2009/stand. | 2030        | 2030/stand.   | 2060        | 2060/stand.   | 2090       | 2090/stand.   |
| 2001      | 2000-2009/stand. | 2031        | 2030/stand.   | 2061        | 2060/stand.   | 2091       | 2090/stand.   |
| 2002      | 2000-2009/stand. | 2032        | 2030/extr.    | 2062        | 2060/extr.    | 2092       | 2090/extr.    |
| 2003      | 2000-2009/stand. | 2033        | 2030/stand.   | 2063        | 2060/stand.   | 2093       | 2090/stand.   |
| 2004      | 2000-2009/stand. | 2034        | 2030/stand.   | 2064        | 2060/stand.   | 2094       | 2090/stand.   |
| 2005      | 2000-2009/stand. | 2035        | 2030/stand.   | 2065        | 2060/stand.   | 2095       | 2090/stand.   |
| 2006      | 2000-2009/stand. | 2036        | 2030/stand.   | 2066        | 2060/stand.   | 2096       | 2090/stand.   |
| 2007      | 2000-2009/stand. | 2037        | 2030/extr.    | 2067        | 2060/extr.    | 2097       | 2090/extr.    |
| 2008      | 2000-2009/stand. | 2038        | 2030/stand.   | 2068        | 2060/stand.   | 2098       | 2090/stand.   |
| 2009      | 2000-2009/stand. | 2039        | 2030/stand.   | 2069        | 2060/stand.   | 2099       | 2090/stand.   |
| 2010      | 2010/A1B/stand.  | 2040        | 2040/stand.   | 2070        | 2070/stand.   | 2100       | 2100/stand.   |

*en italic : années bissextiles*

## 10.3.1.3. Paramètres de trafic

| Modèle DARWin-ME    |                                  |          |         |  |
|---------------------|----------------------------------|----------|---------|--|
| Modélisation        |                                  |          |         |  |
| Paramètres trafic   |                                  |          |         |  |
| <b>Hypothèses :</b> | TJM                              | variable | [vhc/j] | (selon classe de trafic ; trafic moyen)    |
|                     | % PL                             | variable | [%]     | (selon statistique routière Suisse)        |
|                     | Nombre voies                     | variable | [-]     | (selon type de route, type de trafic)      |
|                     | %PL dans direction 1             | variable | [-]     | (selon type de route, type de trafic)      |
|                     | %PL dans voie 1                  | variable | [-]     | (selon type de route, type de trafic)      |
|                     | Vitesse                          | variable | [km/h]  | (selon type de route)                      |
|                     | Ajustement mensuel               | variable | [-]     | (selon type de trafic ; selon SN 640 005b) |
|                     | Distribution PL                  | variable | [-]     | (selon type de trafic ; selon SN 640 005b) |
|                     | Ajustement horaire               | variable | [-]     | (selon type de trafic ; selon SN 640 005b) |
|                     | Taux d'accroissement trafic      | variable | [%]     | (selon statistique routière Suisse)        |
|                     | Distribution charges par essieux | fixe     | [%]     | (valeurs par défaut DARWin-ME)             |
|                     | Données générales PL             | fixe     | [...]   | (valeurs par défaut DARWin-ME)             |

## Paramètres de trafic :

| Classe de trafic | TF <sub>X20</sub> [ESAL/j] | TJM <sub>X20</sub> [vhc/j] | TJM <sub>choisi</sub> [vhc/j] | % PL | TJM <sub>xPL</sub> [PL/j] | Taux d'accroissement trafic [%] | Nombre voies dans direction 1 |
|------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 3                | 101 ... 300                | 2700 ... 6200              | 3'600                         | 6    | 216                       | 3                               | 1                             |
| 4                | 301 ... 1000               | 6200 ... 20'700            | 12'000                        | 6    | 720                       | 3                               | 1                             |
| 5                | 1001 ... 3000              | 20'700 ... 53'300          | 37'000                        | 7    | 2590                      | 4                               | 2                             |
| 6                | 3001 ... 10'000            | 53'300 ... 177'700         | 120'000                       | 7    | 8400                      | 4                               | 3                             |

| Classe de trafic | %PL dans direction 1 | %PL dans voie 1 | Vitesse [km/h] | Ajustement mensuel [-] | Distribution PL [-] | Ajustement horaire [-] |
|------------------|----------------------|-----------------|----------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| 3                | 50                   | 100             | 80             | SC                     | TTC 14              | S1                     |
| 4                | 50                   | 100             | 80             | SC                     | TTC 14              | S1                     |
| 5                | 50                   | 95              | 100            | SC                     | TTC 13              | S1                     |
| 6                | 50                   | 95              | 100            | SC                     | TTC 13              | S1                     |







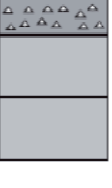


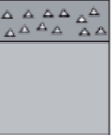


## 10.3.1.4. Paramètres structurels

| Modèle DARWin-ME                                  |                        |           |                          |                            |                                   |              |
|---|------------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Modélisation                                      |                        |           |                          |                            |                                   |              |
| Paramètres structurels - Revêtements souples      |                        |           |                          |                            |                                   |              |
| <b>Plate-forme -<br/>Classe de<br/>portance :</b> | Classe                 | CBR [%]   | CBR <sub>moyen</sub> [%] | M <sub>r,moyen</sub> [psi] | M <sub>r,moyen</sub> [MPa]        | Matériau [-] |
|   | 2                      | 6 ... 12  | 9                        | 10'425.7                   | 71.9                              | GM/A-1-b     |
|   | 3                      | 12 ... 25 | 18                       | 16'246.7                   | 112.1                             | GM/A-1-b     |
|   | 4                      | 25 ...    | 27                       | 21'060.3                   | 145.3                             | GM/A-1-b     |
| <b>Structures :</b>                               | Type de superstructure |           | 1, 2, 5                  | [-]                        | (selon norme SN 640 324b)         |              |
| <b>Caractéristiques :</b>                         | Couches                | variable  |                          | [-]                        | (selon catalogue des structures)  |              |
|   | Epaisseurs             | variable  |                          | [mm]                       | (selon catalogue des structures)  |              |
|   | Interface              | 1         |                          | [-]                        | (encollage parfait)               |              |
|   | Matériaux              | variable  |                          | [-]                        | (selon caractéristiques moyennes) |              |

## Modèle DARWin-ME

## Modélisation

## Paramètres structurels - Revêtements souples

| Couches bitumineuses : | Classe de trafic  | Type de chaussée 1  | Type de chaussée 2  | Type de chaussée 5   |
|------------------------|---|---|---|--|
|                        | T6  |  <p>40 AC 11<br/>90 AC B 22<br/>140 AC T 32<br/>270 mm</p>                           |  <p>40 AC 11<br/><del>60 AC B 16</del><br/>140 AC T 32<br/>180 mm</p> <p>AC F 32</p> |  <p>40 AC 11<br/>60 AC B 16<br/>80 AC T 22<br/>180 mm</p> |
| T5                     |  <p>40 AC 11<br/>70 AC B 22<br/>110 AC T 32<br/>220 mm</p> |  <p>50 AC 11<br/><del>50 AC B 16</del><br/>100 AC T 22<br/>150 mm</p> <p>AC F 22</p> |  <p>40 AC 11<br/>50 AC B 16<br/>60 AC T 22<br/>150 mm</p>                          |  |
| T4                     |  <p>40 AC 11<br/>50 AC B 16<br/>80 AC T 22<br/>170 mm</p> |  <p>40 AC 11<br/>80 AC T 22<br/>120 mm</p> <p>AC F 22</p>                           |  <p>40 AC 11<br/>80 AC T 22<br/>120 mm</p>  |  |
| T3                     |  <p>40 AC 11<br/>90 AC T 22<br/>130 mm</p>               |  <p>40 AC 11<br/>60 AC T 16<br/>100 mm</p> <p>AC F 22</p>                          |  <p>40 AC 11<br/>60 AC T 16<br/>100 mm</p>                                       |  |

**Commentaires :** Selon DARWin-ME : Min 2 couches non-liées nécessaires

Pour S4-SS2 et S2-SS5 à S4-SS5 : La plateforme est divisée en deux couches avec des propriétés identiques (première couche 1000 mm, deuxième couche infinie)

Selon DARWin-ME : Max 3 couches liées possibles

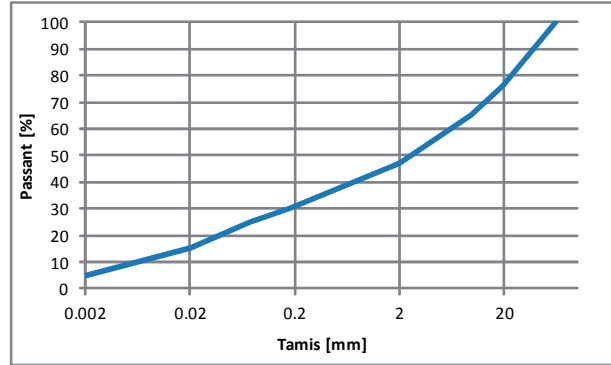
Pour T5-SS2 et T6-SS2 : La couche de liaison est supprimée



10.3.1.5. Paramètres des matériaux

**Modèle DARWin-ME**  
**Modélisation**  
**Paramètres matériaux - Revêtements souples**

|                 |            |                    |
|-----------------|------------|--------------------|
| <b>Sol GM :</b> | IP [%]     | w <sub>L</sub> [%] |
|                 | 3.9        | 17.3               |
|                 | Tamis [mm] | Passant [%]        |
|                 | 0.002      | 5                  |
|                 | 0.02       | 15                 |
|                 | 0.075      | 25                 |
|                 | 0.18       | 30                 |
|                 | 2          | 47                 |
|                 | 9.5        | 65                 |
|                 | 19         | 76                 |
|                 | 63         | 100                |



|                             |                            |               |
|-----------------------------|----------------------------|---------------|
| <b>Grave de fondation :</b> | Matériau [-]               | Crushed stone |
|                             | CBR [%]                    | 50            |
|                             | M <sub>r,moyen</sub> [MPa] | 215           |
|                             | Compactage [-]             | oui           |

**Stabilisation aux liants hydrauliques :** Matériau [-] Cement stabilized

**Chemically Stabilized Material - Layer #3**

General Properties  
 Material type: **Cement Stabilized**  
 Layer thickness (in): 10  
 Unit weight (pcf): 150  
 Poisson's ratio: 0.2

Strength Properties  
 Elastic/resilient modulus (psi): 2000000  
 Minimum elastic/resilient modulus (psi): 100000  
 Modulus of rupture (psi): 650

Thermal Properties  
 Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F): 1.25  
 Heat capacity (BTU/lb-F): 0.28

OK Cancel

**Unbound Layer - Layer #2**

Unbound Material: **Crushed stone** Thickness(in): 10  Last layer

Strength Properties  ICM

Range  Mean

Export Import Update

| Sieve   | Percent Passing |
|---------|-----------------|
| 0.001mm |                 |
| 0.002mm |                 |
| 0.020mm |                 |
| #200    | 8.7             |
| #100    |                 |
| #60     | 12.9            |
| #50     |                 |
| #40     | 20.0            |
| #30     |                 |
| #20     |                 |
| #16     |                 |
| #10     | 33.8            |
| #6      |                 |
| #4      | 44.7            |
| 3/8"    | 57.2            |
| 1/2"    | 63.1            |
| 3/4"    | 72.7            |
| 1"      | 78.8            |
| 1 1/2"  | 85.8            |
| 2"      | 91.6            |
| 2 1/2"  |                 |
| 3"      |                 |
| 3 1/2"  | 97.6            |

Plasticity Index (PI): 1  
 Liquid Limit (LL): 6  
 Compacted Layer:  Yes

Index Properties from Sieve Analysis

|                |        |
|----------------|--------|
| % Passing #200 | 8.7    |
| % Passing #40  | 20.0   |
| % Passing #4   | 44.7   |
| D10 (mm)       | 0.1035 |
| D20 (mm)       | 0.425  |
| D30 (mm)       | 1.306  |
| D60 (mm)       | 10.82  |
| D90 (mm)       | 46.19  |

User Overridable Index Properties

|                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Maximum Dry Unit Weight(pcf)         | <input type="checkbox"/> 127.7 |
| Specific Gravity, Gs                 | <input type="checkbox"/> 2.70  |
| Sat. Hydraulic Conductivity(ft/hr)   | <input type="checkbox"/> 0.051 |
| Optimum gravimetric water content(%) | <input type="checkbox"/> 7.4   |
| Degree of Saturation at Optimum(%)   | 62.2                           |

User Overridable Soil Water Characteristic Curve

|    |                                 |
|----|---------------------------------|
| af | <input type="checkbox"/> 7.255  |
| bf | <input type="checkbox"/> 1.333  |
| cf | <input type="checkbox"/> 0.8242 |
| hr | <input type="checkbox"/> 117.4  |

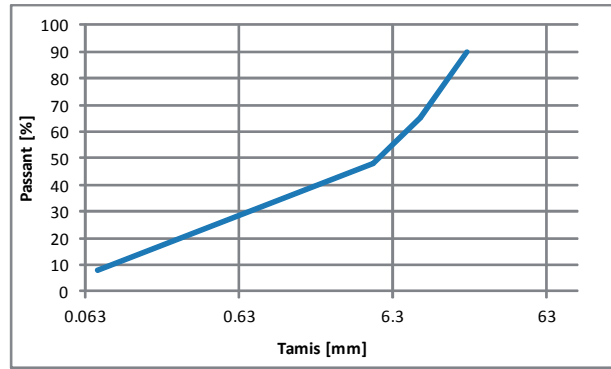
OK Cancel

**Modèle DARWin-ME**

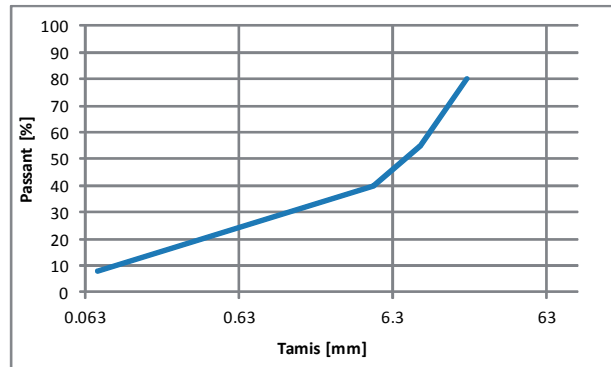
**Modélisation**

**Paramètres matériaux - Revêtements souples**

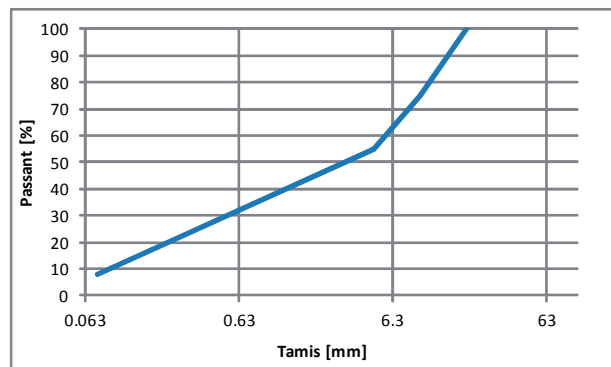
|                               |                |             |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de fondation 1:</b> | Matériau [-]   |             |
|                               | AC F 22        |             |
|                               | Trafic [-]     | Sol [-]     |
|                               | T1 ... T5      | S2 ... S4   |
|                               | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                               | 70 ... 90      | 7.0         |
|                               | Type liant [-] | % liant [%] |
|                               | 85/100         | 4.8         |
|                               | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                               | 0.075          | 8           |
|                               | 4.75           | 48          |
|                               | 9.5            | 65          |
|                               | 19             | 90          |



|                               |                |             |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de fondation 2:</b> | Matériau [-]   |             |
|                               | AC F 32        |             |
|                               | Trafic [-]     | Sol [-]     |
|                               | T6             | S2 ... S4   |
|                               | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                               | 110 ... 140    | 7.0         |
|                               | Type liant [-] | % liant [%] |
|                               | 60/70          | 4.4         |
|                               | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                               | 0.075          | 8           |
|                               | 4.75           | 40          |
|                               | 9.5            | 55          |
|                               | 19             | 80          |



|                          |                |             |
|--------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de base 1:</b> | Matériau [-]   |             |
|                          | ACT 16         |             |
|                          | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                          | 40 ... 60      | 4.0         |
|                          | Type liant [-] | % liant [%] |
|                          | 85/100         | 5.6         |
|                          | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                          | 0.075          | 8           |
|                          | 4.75           | 55          |
|                          | 9.5            | 75          |
|                          | 19             | 100         |

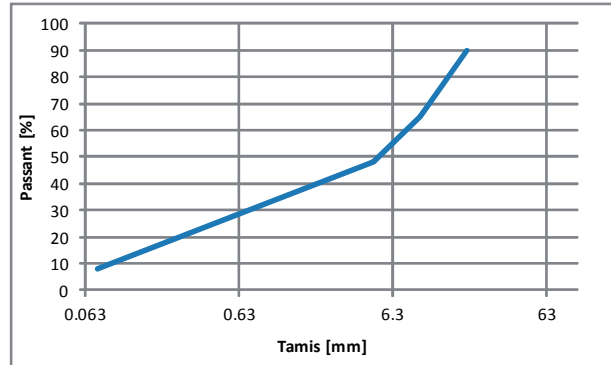


Modèle DARWin-ME

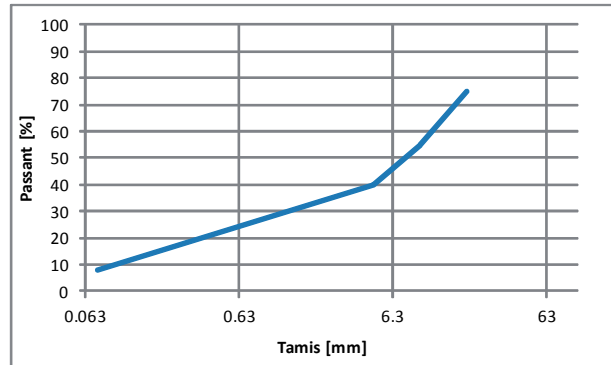
Modélisation

Paramètres matériaux - Revêtements souples

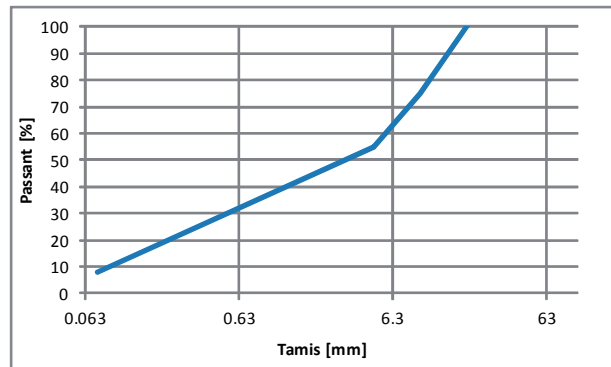
|                          |                |             |
|--------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de base 2:</b> | Matériau [-]   |             |
|                          | ACT 22         |             |
|                          | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                          | 70 ... 90      | 4.0         |
|                          | Type liant [-] | % liant [%] |
|                          | 60/70          | 5.2         |
|                          | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                          | 0.075          | 8           |
|                          | 4.75           | 48          |
|                          | 9.5            | 65          |
|                          | 19             | 90          |



|                          |                |             |
|--------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de base 3:</b> | Matériau [-]   |             |
|                          | ACT 32         |             |
|                          | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                          | 110 ... 140    | 4.0         |
|                          | Type liant [-] | % liant [%] |
|                          | 40/50          | 4.6         |
|                          | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                          | 0.075          | 8           |
|                          | 4.75           | 40          |
|                          | 9.5            | 55          |
|                          | 19             | 75          |



|                             |                |             |
|-----------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de liaison 1:</b> | Matériau [-]   |             |
|                             | AC B 16        |             |
|                             | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                             | 50 ... 60      | 4.0         |
|                             | Type liant [-] | % liant [%] |
|                             | 60/70          | 5.4         |
|                             | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                             | 0.075          | 8           |
|                             | 4.75           | 55          |
|                             | 9.5            | 75          |
|                             | 19             | 100         |

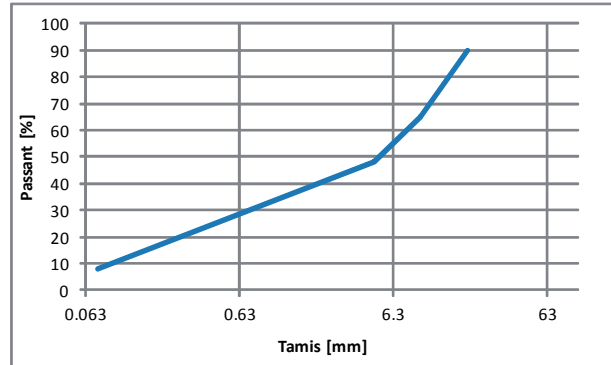


**Modèle DARWin-ME**

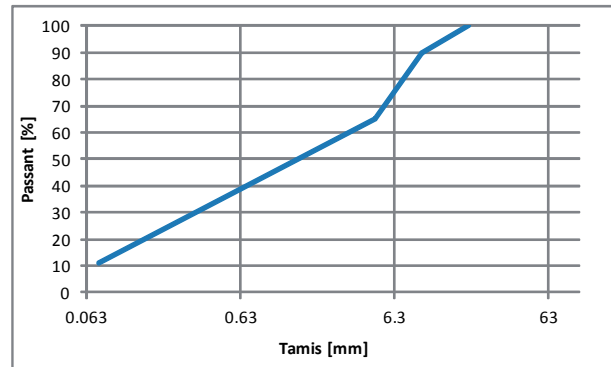
**Modélisation**

**Paramètres matériaux - Revêtements souples**

|                              |                |             |
|------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de liaison 2 :</b> | Matériau [-]   |             |
|                              | AC B 22        |             |
|                              | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                              | 70 ... 90      | 4.0         |
|                              | Type liant [-] | % liant [%] |
|                              | 60/70          | 5.0         |
|                              | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                              | 0.075          | 8           |
|                              | 4.75           | 48          |
|                              | 9.5            | 65          |
|                              | 19             | 90          |



|                                |                |             |
|--------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Couche de roulement 1 :</b> | Matériau [-]   |             |
|                                | AC 11          |             |
|                                | Epaisseur [mm] | % vides [%] |
|                                | 40             | 4.0         |
|                                | Type liant [-] | % liant [%] |
|                                | 60/70          | 6.1         |
|                                | Tamis [mm]     | Passant [%] |
|                                | 0.075          | 11          |
|                                | 4.75           | 65          |
|                                | 9.5            | 90          |
|                                | 19             | 100         |









Annexes

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses
Modèle DARWin-ME
La Chaux-de-Fonds
Sol S2 - Superstructure SSS

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture [Transverse Cracking] [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses
Modèle DARWin-ME
La Chaux-de-Fonds
Sol S2 - Superstructure SSS

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses
Modèle DARWin-ME
La Chaux-de-Fonds
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses
Modèle DARWin-ME
La Chaux-de-Fonds
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.

Table with 9 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking [Long. Cracking] [m/km], AC Bottom Up Cracking [Alligator Cracking] [m/km], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]. Rows include scenarios like réf 1, réf 2, c. terme - B1, etc. for 20 and 25 years.









Annexes

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses  
Modèle DARWin-ME  
Lausanne  
Sol S4 - Superstructure SS2

Trafic T3 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses  
Modèle DARWin-ME  
Lausanne  
Sol S4 - Superstructure SS2

Trafic T5 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]

Trafic T4 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]

Trafic T6 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses  
Modèle DARwin-ME  
Lausanne  
Sol S2 - Superstructure SS5

Trafic T3 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses  
Modèle DARWin-ME  
Lausanne  
Sol S4 - Superstructure SS5

Trafic T5 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]

Trafic T4 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]

Trafic T6 table with columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%]



10.3.2.3. Berne

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S2 - Superstructure S51. Traffic T5. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - A2, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S4 - Superstructure S51. Traffic T5. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S3 - Superstructure S51. Traffic T3. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S3 - Superstructure S51. Traffic T5. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - B1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S2 - Superstructure S52. Traffic T4. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S4 - Superstructure S52. Traffic T6. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - B1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S2 - Superstructure S52. Traffic T5. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - B1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses. Modèle DARWin-ME. Berne. Sol S4 - Superstructure S52. Traffic T5. Table with 7 columns: Durée de vie (an), Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm]. Rows include scenarios ref.1, c. terme - B1, c. terme - A18, c. terme - A2, m. terme - B1, m. terme - A18, m. terme - A2, l. terme - B1, l. terme - A18, l. terme - A2 for durations 20 and 20 years.

Annexes

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Berne  
 Sol S3 - Superstructure SS2

| Trafic T3         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.64       | 1.62   | 0.22   | 0.00   | 1.23                                 | 6.91  |
|                   | c. terme - B1  | 1.64       | 1.84   | 0.26   | 0.00   | 1.34                                 | 7.02  |
|                   | c. terme - A1B | 1.64       | 1.97   | 0.27   | 0.00   | 1.38                                 | 7.07  |
|                   | c. terme - A2  | 1.64       | 1.93   | 0.26   | 0.00   | 1.38                                 | 7.06  |
|                   | m. terme - B1  | 1.64       | 2.18   | 0.29   | 0.00   | 1.46                                 | 7.15  |
|                   | m. terme - A1B | 1.63       | 2.41   | 0.31   | 0.00   | 1.54                                 | 7.20  |
|                   | m. terme - A2  | 1.63       | 2.37   | 0.30   | 0.00   | 1.54                                 | 7.19  |
|                   | l. terme - B1  | 1.64       | 2.35   | 0.31   | 0.00   | 1.50                                 | 7.20  |
|                   | l. terme - A1B | 1.63       | 2.92   | 0.36   | 0.00   | 1.72                                 | 7.37  |
|                   | l. terme - A2  | 1.63       | 3.09   | 0.37   | 0.00   | 1.79                                 | 7.43  |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 13.6%  | 15.2%  | -  | 9.3%                                 | 1.6%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.0%       | 21.6%  | 20.1%  | -  | 12.2%                                | 2.2%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.0%       | 19.1%  | 17.9%  | -  | 12.4%                                | 2.1%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.0%       | 34.6%  | 30.8%  | -  | 18.8%                                | 3.5%  |
|                   | m. terme - A1B | -0.6%      | 48.8%  | 37.1%  | -  | 25.3%                                | 4.1%  |
|                   | m. terme - A2  | -0.6%      | 46.3%  | 35.7%  | -  | 25.3%                                | 4.0%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.0%       | 45.1%  | 37.1%  | -  | 22.2%                                | 4.1%  |
|                   | l. terme - A1B | -0.6%      | 80.2%  | 58.5%  | -  | 39.8%                                | 6.6%  |
|                   | l. terme - A2  | -0.6%      | 90.7%  | 66.1%  | -  | 46.1%                                | 7.5%  |

| Trafic T4         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.67       | 0.96   | 0.13   | 0.00   | 1.92                                 | 7.99  |
|                   | c. terme - B1  | 1.67       | 1.29   | 0.16   | 0.00   | 2.09                                 | 8.13  |
|                   | c. terme - A1B | 1.66       | 1.40   | 0.16   | 0.00   | 2.14                                 | 8.17  |
|                   | c. terme - A2  | 1.66       | 1.43   | 0.16   | 0.00   | 2.15                                 | 8.15  |
|                   | m. terme - B1  | 1.67       | 1.70   | 0.19   | 0.00   | 2.28                                 | 8.32  |
|                   | m. terme - A1B | 1.66       | 1.91   | 0.20   | 0.00   | 2.39                                 | 8.45  |
|                   | m. terme - A2  | 1.66       | 1.88   | 0.20   | 0.00   | 2.39                                 | 8.45  |
|                   | l. terme - B1  | 1.67       | 1.80   | 0.19   | 0.00   | 2.34                                 | 8.42  |
|                   | l. terme - A1B | 1.66       | 2.58   | 0.24   | 0.00   | 2.66                                 | 8.71  |
|                   | l. terme - A2  | 1.66       | 2.88   | 0.25   | 0.00   | 2.78                                 | 8.81  |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 34.4%  | 19.8%  | -  | 8.9%                                 | 1.7%  |
|                   | c. terme - A1B | -0.6%      | 45.8%  | 25.2%  | -  | 11.7%                                | 2.3%  |
|                   | c. terme - A2  | -0.6%      | 49.0%  | 24.4%  | -  | 12.2%                                | 2.0%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.0%       | 77.1%  | 41.2%  | -  | 18.6%                                | 4.1%  |
|                   | m. terme - A1B | -0.6%      | 99.0%  | 51.1%  | -  | 24.6%                                | 5.8%  |
|                   | m. terme - A2  | -0.6%      | 95.8%  | 49.6%  | -  | 24.6%                                | 5.7%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.0%       | 87.5%  | 47.3%  | -  | 21.7%                                | 5.3%  |
|                   | l. terme - A1B | -0.6%      | 168.8%   | 80.9%  | -  | 38.5%                                | 9.0%  |
|                   | l. terme - A2  | -0.6%      | 200.0%   | 91.6%  | -  | 44.7%                                | 10.2%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Berne  
 Sol S2 - Superstructure SS5

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.78       | 0.18   | 0.00   | 0.00   | 5.81                                 | 12.37                                       | 0.52                     |
|                   | ref.2          | 1.82       | 0.64   | 0.00   | 0.00   | 7.96                                 | 14.68                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.78       | 0.28   | 0.00   | 0.00   | 6.35                                 | 12.93                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.79       | 0.31   | 0.00   | 0.00   | 6.50                                 | 13.10                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.79       | 0.32   | 0.00   | 0.00   | 6.52                                 | 13.11                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.79       | 0.38   | 0.00   | 0.00   | 6.92                                 | 13.53                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.80       | 0.48   | 0.00   | 0.00   | 7.32                                 | 13.93                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.80       | 0.48   | 0.00   | 0.00   | 7.31                                 | 13.92                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.80       | 0.42   | 0.00   | 0.00   | 7.13                                 | 13.75                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.81       | 0.78   | 0.00   | 0.00   | 8.19                                 | 14.81                                       | 0.52                     |
| l. terme - A2     | 1.82           | 0.95       | 0.00   | 0.00   | 8.56   | 15.18                                | 0.52  |                          |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | -  | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
|                   | ref.2          | 2.2%       | 255.6%   | -  | -  | 37.1%                                | 38.4%                                       | -0.2%                    |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 56.0%  | -  | -  | 9.3%                                 | 4.6%  | -0.2%                    |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | 72.2%  | -  | -  | 12.0%                                | 5.9%  | -0.2%                    |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | 77.8%  | -  | -  | 12.3%                                | 6.0%  | 0.0%                     |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 111.1%   | -  | -  | 19.2%                                | 9.4%  | -0.2%                    |
|                   | m. terme - A1B | 1.1%       | 166.7%   | -  | -  | 26.0%                                | 12.6%                                       | 0.0%                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.1%       | 166.7%   | -  | -  | 26.0%                                | 12.5%                                       | 0.0%                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.1%       | 133.3%   | -  | -  | 22.8%                                | 11.2%                                       | -0.2%                    |
|                   | l. terme - A1B | 1.7%       | 333.3%   | -  | -  | 41.1%                                | 19.8%                                       | 0.0%                     |
| l. terme - A2     | 2.2%           | 427.8%     | -  | -  | 47.4%  | 22.7%                                | 0.0%  |                          |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Berne  
 Sol S3 - Superstructure SS2

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.75       | 0.68   | 0.08   | 0.00   | 4.35                                 | 11.42                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.76       | 1.12   | 0.10   | 0.00   | 4.75                                 | 11.82                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.76       | 1.30   | 0.11   | 0.00   | 4.91                                 | 11.98                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.76       | 1.33   | 0.11   | 0.00   | 4.91                                 | 11.96                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.76       | 1.70   | 0.13   | 0.00   | 5.19                                 | 12.28                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.76       | 2.23   | 0.14   | 0.00   | 5.43                                 | 12.48                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.76       | 2.22   | 0.14   | 0.00   | 5.45                                 | 12.51                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.76       | 1.89   | 0.13   | 0.00   | 5.32                                 | 12.42                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.77       | 3.52   | 0.18   | 0.00   | 6.03                                 | 13.09                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.77       | 4.24   | 0.19   | 0.00   | 6.29                                 | 13.33                                       |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 64.7%  | 34.2%  | -  | 9.1%                                 | 3.5%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | 91.2%  | 42.1%  | -  | 12.8%                                | 4.9%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | 95.6%  | 42.1%  | -  | 12.8%                                | 4.8%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 150.0%   | 67.1%  | -  | 19.2%                                | 7.6%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.6%       | 227.9%   | 81.6%  | -  | 24.9%                                | 9.3%  |
|                   | m. terme - A2  | 0.6%       | 226.5%   | 82.9%  | -  | 25.3%                                | 9.5%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.6%       | 177.9%   | 76.3%  | -  | 22.2%                                | 8.8%  |
|                   | l. terme - A1B | 1.1%       | 417.6%   | 136.8%   | -  | 38.6%                                | 14.6%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.1%       | 523.5%   | 155.3%   | -  | 44.7%                                | 16.8%                                       |

| Trafic T6         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.77       | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 5.33                                 | 12.01                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.77       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 5.83                                 | 12.54                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.78       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 5.99                                 | 12.71                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.78       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 5.99                                 | 12.69                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.78       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 6.34                                 | 13.08                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.78       | 0.03   | 0.01   | 0.00   | 6.64                                 | 13.36                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.78       | 0.03   | 0.01   | 0.00   | 6.66                                 | 13.37                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.78       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 6.49                                 | 13.24                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.79       | 0.04   | 0.01   | 0.00   | 7.36                                 | 14.07                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.80       | 0.05   | 0.01   | 0.00   | 7.68                                 | 14.38                                       |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 100.0%   | 245.3%   | -  | 9.2%                                 | 4.4%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | 100.0%   | 269.8%   | -  | 12.5%                                | 5.8%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | 100.0%   | 275.4%   | -  | 12.4%                                | 5.6%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 100.0%   | 550.2%   | -  | 19.0%                                | 8.9%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.6%       | 200.0%   | 680.8%   | -  | 24.5%                                | 11.2%                                       |
|                   | m. terme - A2  | 0.6%       | 200.0%   | 766.4%   | -  | 24.9%                                | 11.3%                                       |
|                   | l. terme - B1  | 0.6%       | 100.0%   | 625.2%   | -  | 21.8%                                | 10.2%                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.1%       | 300.0%   | 1596.7%  | -  | 38.1%                                | 17.1%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.7%       | 400.0%   | 1897.0%  | -  | 44.1%                                | 19.7%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Berne  
 Sol S4 - Superstructure SS5

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.75       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 5.40                                 | 11.23                                       | 0.52                     |
|                   | ref.2          | 1.78       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.30                                 | 13.65                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.75       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 5.92                                 | 11.62                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.75       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.06                                 | 11.77                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.75       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.07                                 | 11.77                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.38                                 | 12.09                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.71                                 | 12.40                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.70                                 | 12.39                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.55                                 | 12.26                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.77       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.57                                 | 13.25                                       | 0.52                     |
| l. terme - A2     | 1.78           | 0.00       | 0.00   | 0.00   | 7.93   | 13.58                                | 0.52  |                          |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | -  | -  | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
|                   | ref.2          | 1.7%       | -  | -  | -  | 35.2%                                | 16.3%                                       | 0.0%                     |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | -  | -  | -  | 9.6%                                 | 3.5%  | -0.2%                    |
|                   | c. terme - A1B | 0.0%       | -  | -  | -  | 12.2%                                | 4.8%  | -0.2%                    |
|                   | c. terme - A2  | 0.0%       | -  | -  | -  | 12.5%                                | 4.9%  | 0.0%                     |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | -  | -  | -  | 18.2%                                | 7.7%  | 0.0%                     |
|                   | m. terme - A1B | 0.6%       | -  | -  | -  | 24.2%                                | 10.4%                                       | 0.0%                     |
|                   | m. terme - A2  | 0.6%       | -  | -  | -  | 24.2%                                | 10.4%                                       | 0.0%                     |
|                   | l. terme - B1  | 0.6%       | -  | -  | -  | 21.3%                                | 9.2%  | 0.0%                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.1%       | -  | -  | -  | 40.3%                                | 18.0%                                       | 0.4%                     |
| l. terme - A2     | 1.7%           | -          | -  | -  | 46.8%  | 21.0%                                | 0.4%  |                          |















**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Alt Dorf  
 Sol S3 - Superstructure SS2

| Trafic T3         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.65       | 2.22   | 0.31   | 0.00   | 1.38                                 | 7.18  |
|                   | c. terme - B1  | 1.64       | 2.80   | 0.37   | 0.00   | 1.56                                 | 7.39  |
|                   | c. terme - A1B | 1.64       | 2.94   | 0.38   | 0.00   | 1.61                                 | 7.43  |
|                   | c. terme - A2  | 1.64       | 2.78   | 0.36   | 0.00   | 1.57                                 | 7.36  |
|                   | m. terme - B1  | 1.64       | 3.18   | 0.41   | 0.00   | 1.67                                 | 7.50  |
|                   | m. terme - A1B | 1.64       | 3.43   | 0.43   | 0.00   | 1.77                                 | 7.59  |
|                   | m. terme - A2  | 1.64       | 3.33   | 0.42   | 0.00   | 1.76                                 | 7.56  |
|                   | l. terme - B1  | 1.64       | 3.41   | 0.43   | 0.00   | 1.75                                 | 7.58  |
|                   | l. terme - A1B | 1.63       | 3.96   | 0.48   | 0.00   | 1.93                                 | 7.72  |
|                   | l. terme - A2  | 1.63       | 4.15   | 0.49   | 0.00   | 1.99                                 | 7.77  |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | -0.6%      | 26.1%  | 20.7%  | -  | 13.3%                                | 2.8%  |
|                   | c. terme - A1B | -0.6%      | 32.4%  | 24.9%  | -  | 16.4%                                | 3.4%  |
|                   | c. terme - A2  | -0.6%      | 25.2%  | 17.4%  | -  | 13.9%                                | 2.5%  |
|                   | m. terme - B1  | -0.6%      | 43.2%  | 33.8%  | -  | 21.4%                                | 4.5%  |
|                   | m. terme - A1B | -0.6%      | 54.5%  | 40.3%  | -  | 28.6%                                | 5.7%  |
|                   | m. terme - A2  | -0.6%      | 50.0%  | 37.0%  | -  | 27.8%                                | 5.3%  |
|                   | l. terme - B1  | -0.6%      | 53.6%  | 41.0%  | -  | 26.5%                                | 5.5%  |
|                   | l. terme - A1B | -1.2%      | 78.4%  | 56.7%  | -  | 40.2%                                | 7.5%  |
|                   | l. terme - A2  | -1.2%      | 86.9%  | 61.6%  | -  | 44.6%                                | 8.2%  |

| Trafic T4         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.67       | 1.54   | 0.18   | 0.00   | 2.15                                 | 8.24  |
|                   | c. terme - B1  | 1.68       | 2.06   | 0.24   | 0.00   | 2.44                                 | 8.66  |
|                   | c. terme - A1B | 1.67       | 2.27   | 0.25   | 0.00   | 2.50                                 | 8.70  |
|                   | c. terme - A2  | 1.67       | 2.16   | 0.23   | 0.00   | 2.45                                 | 8.58  |
|                   | m. terme - B1  | 1.67       | 2.63   | 0.27   | 0.00   | 2.61                                 | 8.78  |
|                   | m. terme - A1B | 1.67       | 3.01   | 0.29   | 0.00   | 2.76                                 | 8.95  |
|                   | m. terme - A2  | 1.67       | 2.90   | 0.28   | 0.00   | 2.74                                 | 8.92  |
|                   | l. terme - B1  | 1.67       | 2.92   | 0.29   | 0.00   | 2.72                                 | 8.92  |
|                   | l. terme - A1B | 1.67       | 3.67   | 0.33   | 0.00   | 3.00                                 | 9.20  |
|                   | l. terme - A2  | 1.67       | 4.00   | 0.34   | 0.00   | 3.08                                 | 9.28  |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 33.8%  | 28.3%  | -  | 13.4%                                | 5.2%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.0%       | 47.4%  | 33.7%  | -  | 16.5%                                | 6.6%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.0%       | 40.3%  | 23.4%  | -  | 13.8%                                | 4.2%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.0%       | 70.8%  | 45.1%  | -  | 21.4%                                | 6.7%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.0%       | 95.5%  | 57.6%  | -  | 28.2%                                | 8.7%  |
|                   | m. terme - A2  | 0.0%       | 88.3%  | 52.7%  | -  | 27.6%                                | 8.4%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.0%       | 89.6%  | 56.0%  | -  | 26.3%                                | 8.3%  |
|                   | l. terme - A1B | 0.0%       | 138.3%   | 79.9%  | -  | 39.4%                                | 11.7%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 0.0%       | 159.7%   | 86.4%  | -  | 43.5%                                | 12.7%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Alt Dorf  
 Sol S2 - Superstructure SS5

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.79       | 0.28   | 0.00   | 0.00   | 6.50                                 | 13.19                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.80       | 0.38   | 0.00   | 0.00   | 7.04                                 | 13.75                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.81       | 0.47   | 0.00   | 0.00   | 7.39                                 | 14.11                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.81       | 0.53   | 0.00   | 0.00   | 7.62                                 | 14.34                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.82       | 0.63   | 0.00   | 0.00   | 7.98                                 | 14.72                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.82       | 0.81   | 0.00   | 0.00   | 8.45                                 | 15.19                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.82       | 0.78   | 0.00   | 0.00   | 8.39                                 | 15.11                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.82       | 0.75   | 0.00   | 0.00   | 8.31                                 | 15.07                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.80       | 1.19   | 0.00   | 0.00   | 9.23                                 | 15.98                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A2  | 1.80       | 1.38   | 0.00   | 0.00   | 9.53                                 | 16.28                                       | 0.52                     |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | -  | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
|                   | ref.2          | 0.6%       | 35.7%  | -  | -  | 8.3%                                 | 4.2%  | 0.0%                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.1%       | 67.0%  | -  | -  | 13.7%                                | 7.0%  | 0.0%                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.1%       | 89.3%  | -  | -  | 17.2%                                | 8.7%  | 0.0%                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.1%       | 71.4%  | -  | -  | 14.5%                                | 7.1%  | 0.0%                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.7%       | 125.0%   | -  | -  | 22.8%                                | 11.6%                                       | 0.0%                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.7%       | 189.3%   | -  | -  | 30.0%                                | 15.1%                                       | 0.0%                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.7%       | 178.6%   | -  | -  | 29.1%                                | 14.6%                                       | 0.0%                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.7%       | 167.9%   | -  | -  | 28.0%                                | 14.2%                                       | 0.0%                     |
|                   | l. terme - A1B | 2.8%       | 325.0%   | -  | -  | 42.0%                                | 21.2%                                       | 0.0%                     |
| l. terme - A2     | 2.8%           | 392.0%     | -  | -  | 46.7%  | 23.4%                                | 0.0%  |                          |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Alt Dorf  
 Sol S3 - Superstructure SS2

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.76       | 1.20   | 0.11   | 0.00   | 4.84                                 | 11.98                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.78       | 2.08   | 0.16   | 0.00   | 5.54                                 | 12.79                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.78       | 2.39   | 0.18   | 0.00   | 5.69                                 | 12.95                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.78       | 2.16   | 0.16   | 0.00   | 5.57                                 | 12.78                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.78       | 2.88   | 0.20   | 0.00   | 5.94                                 | 13.22                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.78       | 3.79   | 0.23   | 0.00   | 6.26                                 | 13.51                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.78       | 3.64   | 0.22   | 0.00   | 6.24                                 | 13.47                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.79       | 3.47   | 0.22   | 0.00   | 6.16                                 | 13.44                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.79       | 5.36   | 0.27   | 0.00   | 6.80                                 | 14.04                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.79       | 6.14   | 0.28   | 0.00   | 6.99                                 | 14.22                                       |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 1.1%       | 73.3%  | 43.9%  | -  | 14.3%                                | 6.8%  |
|                   | c. terme - A1B | 1.1%       | 99.2%  | 53.3%  | -  | 17.6%                                | 8.1%  |
|                   | c. terme - A2  | 1.1%       | 80.0%  | 39.5%  | -  | 15.0%                                | 6.7%  |
|                   | m. terme - B1  | 1.1%       | 140.0%   | 74.6%  | -  | 22.7%                                | 10.3%                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.1%       | 215.8%   | 97.4%  | -  | 29.2%                                | 12.8%                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.1%       | 203.3%   | 89.5%  | -  | 28.8%                                | 12.4%                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.7%       | 189.2%   | 91.2%  | -  | 27.3%                                | 12.2%                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.7%       | 346.7%   | 134.2%   | -  | 40.5%                                | 17.2%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.7%       | 411.7%   | 144.7%   | -  | 44.5%                                | 18.7%                                       |

| Trafic T6         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.78       | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 5.94                                 | 12.78                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.80       | 0.03   | 0.01   | 0.00   | 6.79                                 | 13.68                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.80       | 0.03   | 0.01   | 0.00   | 6.98                                 | 13.87                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.80       | 0.03   | 0.01   | 0.00   | 6.82                                 | 13.68                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.81       | 0.04   | 0.01   | 0.00   | 7.27                                 | 14.19                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.81       | 0.05   | 0.02   | 0.00   | 7.66                                 | 14.57                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.81       | 0.04   | 0.01   | 0.00   | 7.54                                 | 14.53                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.81       | 0.04   | 0.01   | 0.00   | 7.54                                 | 14.47                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.82       | 0.06   | 0.02   | 0.00   | 8.29                                 | 15.20                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.82       | 0.07   | 0.02   | 0.00   | 8.52                                 | 15.41                                       |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 1.1%       | 50.0%  | 228.2%   | -  | 14.4%                                | 7.1%  |
|                   | c. terme - A1B | 1.1%       | 50.0%  | 310.8%   | -  | 17.3%                                | 8.6%  |
|                   | c. terme - A2  | 1.1%       | 50.0%  | 227.7%   | -  | 14.8%                                | 7.1%  |
|                   | m. terme - B1  | 1.7%       | 100.0%   | 407.0%   | -  | 22.4%                                | 11.0%                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.7%       | 150.0%   | 651.2%   | -  | 28.9%                                | 14.0%                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.7%       | 100.0%   | 599.5%   | -  | 28.6%                                | 13.7%                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.7%       | 100.0%   | 580.8%   | -  | 27.0%                                | 13.3%                                       |
|                   | l. terme - A1B | 2.2%       | 200.0%   | 918.8%   | -  | 39.6%                                | 18.9%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 2.2%       | 250.0%   | 1036.2%  | -  | 43.4%                                | 20.6%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Alt Dorf  
 Sol S4 - Superstructure SS5

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.06                                 | 11.87                                       | 0.52                     |
|                   | ref.2          | 1.76       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.44                                 | 12.26                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.77       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.82                                 | 12.64                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.77       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.99                                 | 12.78                                       | 0.52                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.77       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 6.85                                 | 12.63                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.78       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.32                                 | 13.13                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.78       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.79                                 | 13.58                                       | 0.52                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.78       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.73                                 | 13.52                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.78       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 7.64                                 | 13.46                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.79       | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 8.52                                 | 14.31                                       | 0.52                     |
| l. terme - A2     | 1.80           | 0.00       | 0.00   | 0.00   | 8.80   | 14.58                                | 0.52  |                          |
| 20                | ref.1          | 0.0%       | -  | -  | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
|                   | ref.2          | 0.0%       | -  | -  | -  | 6.3%                                 | 3.2%  | 0.0%                     |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | -  | -  | -  | 12.5%                                | 6.4%  | 0.2%                     |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | -  | -  | -  | 15.3%                                | 7.7%  | 0.2%                     |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | -  | -  | -  | 13.0%                                | 6.4%  | 0.2%                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.1%       | -  | -  | -  | 20.8%                                | 10.6%                                       | 0.2%                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.1%       | -  | -  | -  | 28.5%                                | 14.4%                                       | 0.4%                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.1%       | -  | -  | -  | 27.6%                                | 13.8%                                       | 0.4%                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.1%       | -  | -  | -  | 26.1%                                | 13.3%                                       | 0.2%                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.7%       | -  | -  | -  | 40.5%                                | 20.3%                                       | 0.6%                     |
| l. terme - A2     | 2.3%           | -          | -  | -  | 45.3%  | 22.8%                                | 0.6%  |                          |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Aitdorf  
 Sol S3 - Superstructure SSS

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T3  |  |   |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|---|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/km] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.64       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.62                                 | 6.82  | 0.15                     |
|                   | ref.2          | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.74                                 | 6.94  | 0.15                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.83                                 | 7.08  | 0.15                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.89                                 | 7.26  | 0.15                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.85                                 | 7.02  | 0.15                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 1.97                                 | 7.17  | 0.15                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.08                                 | 7.27  | 0.15                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.07                                 | 7.26  | 0.15                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.63       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.05                                 | 7.25  | 0.15                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.62       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.27                                 | 7.45  | 0.15                     |
|                   | l. terme - A2  | 1.62       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.34                                 | 7.50  | 0.15                     |
|                   | ref.1          | 0.0%       | -  | -   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
| ref.2             | -0.6%          | -          | -  | -   | -7.2%  | -1.7%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - B1     | -0.6%          | -          | -  | -   | -13.3%   | -3.2%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - A1B    | -0.6%          | -          | -  | -   | -16.5%   | -3.8%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - A2     | -0.6%          | -          | -  | -   | -14.2%   | -3.0%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - B1     | -0.6%          | -          | -  | -   | -21.8%   | -5.1%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - A1B    | -0.6%          | -          | -  | -   | -28.4%   | -6.5%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - A2     | -0.6%          | -          | -  | -   | -27.6%   | -6.1%                                | 0.0%  |                          |
| l. terme - B1     | -0.6%          | -          | -  | -   | -28.7%   | -6.3%                                | 0.0%  |                          |
| l. terme - A1B    | -1.2%          | -          | -  | -   | -40.0%   | -9.2%                                | 0.0%  |                          |
| l. terme - A2     | -1.2%          | -          | -  | -   | -44.4%   | -10.0%                               | 0.7%  |                          |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Aitdorf  
 Sol S3 - Superstructure SSS

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T5  |  |   |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|---|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/km] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.78       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 6.18                                 | 12.49                                       | 0.51                     |
|                   | ref.2          | 1.78       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 6.58                                 | 12.91                                       | 0.51                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.79       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 6.96                                 | 13.29                                       | 0.51                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.79       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 7.33                                 | 13.65                                       | 0.51                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.79       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 6.98                                 | 13.28                                       | 0.51                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.80       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 7.49                                 | 13.83                                       | 0.51                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.80       | 0.02   | 0.00  | 0.00   | 7.97                                 | 14.30                                       | 0.51                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.80       | 0.02   | 0.00  | 0.00   | 7.93                                 | 14.27                                       | 0.51                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.80       | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 7.84                                 | 14.19                                       | 0.51                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.81       | 0.03   | 0.00  | 0.00   | 8.71                                 | 15.03                                       | 0.52                     |
|                   | l. terme - A2  | 1.82       | 0.03   | 0.00  | 0.00   | 9.00                                 | 15.31                                       | 0.52                     |
|                   | ref.1          | 0.0%       | -  | -   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
| ref.2             | 0.0%           | -          | -  | -   | -6.6%  | -3.3%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - B1     | 0.6%           | -          | -  | -   | -12.6%   | -6.4%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - A1B    | 0.6%           | -          | -  | -   | -15.4%   | -7.7%                                | 0.2%  |                          |
| c. terme - A2     | 0.6%           | -          | -  | -   | -13.0%   | -6.3%                                | 0.2%  |                          |
| m. terme - B1     | 1.1%           | -          | -  | -   | -21.3%   | -10.7%                               | 0.2%  |                          |
| m. terme - A1B    | 1.1%           | -          | -  | -   | -29.1%   | -14.4%                               | 0.2%  |                          |
| m. terme - A2     | 1.1%           | -          | -  | -   | -28.1%   | -13.9%                               | 0.2%  |                          |
| l. terme - B1     | 1.1%           | -          | -  | -   | -25.9%   | -13.6%                               | 0.2%  |                          |
| l. terme - A1B    | 1.7%           | -          | -  | -   | -41.0%   | -20.3%                               | 0.4%  |                          |
| l. terme - A2     | 2.2%           | -          | -  | -   | -45.7%   | -22.6%                               | 0.4%  |                          |

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T4  |  |   |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|---|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/km] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.69                                 | 8.28  | 0.26                     |
|                   | ref.2          | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 2.89                                 | 8.49  | 0.26                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.06                                 | 8.67  | 0.26                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.15                                 | 8.74  | 0.26                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.08                                 | 8.65  | 0.26                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.28                                 | 8.89  | 0.26                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.47                                 | 9.05  | 0.26                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.45                                 | 9.02  | 0.26                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.42                                 | 9.02  | 0.26                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.77                                 | 9.35  | 0.26                     |
|                   | l. terme - A2  | 1.67       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 3.89                                 | 9.45  | 0.26                     |
|                   | ref.1          | 0.0%       | -  | -   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
| ref.2             | 0.0%           | -          | -  | -   | -7.7%  | -2.6%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - B1     | 0.0%           | -          | -  | -   | -14.1%   | -4.7%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - A1B    | 0.0%           | -          | -  | -   | -17.3%   | -5.6%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - A2     | 0.0%           | -          | -  | -   | -14.6%   | -4.5%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - B1     | 0.0%           | -          | -  | -   | -22.3%   | -7.3%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - A1B    | 0.0%           | -          | -  | -   | -29.1%   | -9.3%                                | 0.0%  |                          |
| m. terme - A2     | 0.0%           | -          | -  | -   | -28.5%   | -9.0%                                | 0.0%  |                          |
| l. terme - B1     | 0.0%           | -          | -  | -   | -27.2%   | -8.9%                                | 0.0%  |                          |
| l. terme - A1B    | 0.0%           | -          | -  | -   | -40.4%   | -13.0%                               | 0.4%  |                          |
| l. terme - A2     | 0.0%           | -          | -  | -   | -44.7%   | -14.1%                               | 0.4%  |                          |

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T6  |  |   |  |                                      |   |                          |
|-------------------|----------------|------------|--|---|--|--------------------------------------|---|--------------------------|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/km] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] | CMS Fatigue Cracking [%] |
| 20                | ref.1          | 1.90       | 1.00   | 0.00  | 0.00   | 11.02                                | 17.43                                       | 0.86                     |
|                   | ref.2          | 1.92       | 1.28   | 0.00  | 0.00   | 11.91                                | 18.33                                       | 0.86                     |
|                   | c. terme - B1  | 1.93       | 1.63   | 0.00  | 0.00   | 12.57                                | 19.00                                       | 0.86                     |
|                   | c. terme - A1B | 1.94       | 1.84   | 0.00  | 0.00   | 12.94                                | 19.36                                       | 0.86                     |
|                   | c. terme - A2  | 1.93       | 1.70   | 0.00  | 0.00   | 12.65                                | 19.05                                       | 0.86                     |
|                   | m. terme - B1  | 1.95       | 2.16   | 0.00  | 0.00   | 13.49                                | 19.93                                       | 0.86                     |
|                   | m. terme - A1B | 1.96       | 2.78   | 0.00  | 0.00   | 14.22                                | 20.66                                       | 0.86                     |
|                   | m. terme - A2  | 1.96       | 2.69   | 0.00  | 0.00   | 14.17                                | 20.59                                       | 0.86                     |
|                   | l. terme - B1  | 1.96       | 2.56   | 0.00  | 0.00   | 14.01                                | 20.45                                       | 0.86                     |
|                   | l. terme - A1B | 1.98       | 4.11   | 0.00  | 0.00   | 15.45                                | 21.89                                       | 0.86                     |
|                   | l. terme - A2  | 1.99       | 4.81   | 0.00  | 0.00   | 15.90                                | 22.43                                       | 0.86                     |
|                   | ref.1          | 0.0%       | -  | -   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  | 0.0%                     |
| ref.2             | 1.1%           | -          | -  | -   | -8.1%  | -5.2%                                | 0.0%  |                          |
| c. terme - B1     | 1.6%           | -          | -  | -   | -14.1%   | -9.0%                                | 0.1%  |                          |
| c. terme - A1B    | 2.1%           | -          | -  | -   | -17.4%   | -11.1%                               | 0.1%  |                          |
| c. terme - A2     | 1.6%           | -          | -  | -   | -14.8%   | -9.3%                                | 0.1%  |                          |
| m. terme - B1     | 2.6%           | -          | -  | -   | -22.4%   | -14.3%                               | 0.1%  |                          |
| m. terme - A1B    | 3.2%           | -          | -  | -   | -29.1%   | -18.5%                               | 0.1%  |                          |
| m. terme - A2     | 3.2%           | -          | -  | -   | -28.6%   | -18.1%                               | 0.2%  |                          |
| l. terme - B1     | 3.2%           | -          | -  | -   | -27.1%   | -17.3%                               | 0.1%  |                          |
| l. terme - A1B    | 4.2%           | -          | -  | -   | -40.2%   | -25.6%                               | 0.2%  |                          |
| l. terme - A2     | 4.7%           | -          | -  | -   | -44.3%   | -28.1%                               | 0.4%  |                          |

10.3.2.6. Sion

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S2 - Superstructure SSI

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T5  |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.80       | 0.42   | 0.01   | 0.00   | 5.49                                 | 14.22                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.81       | 0.57   | 0.02   | 0.00   | 6.00                                 | 14.73                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.80       | 0.75   | 0.02   | 0.00   | 6.10                                 | 14.80                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.80       | 0.76   | 0.02   | 0.00   | 6.09                                 | 14.76                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.81       | 0.94   | 0.02   | 0.00   | 6.42                                 | 15.16                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.81       | 1.23   | 0.03   | 0.00   | 6.72                                 | 15.37                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.81       | 1.22   | 0.03   | 0.00   | 6.67                                 | 15.28                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.82       | 1.15   | 0.03   | 0.00   | 6.70                                 | 15.43                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.81       | 1.59   | 0.04   | 0.00   | 7.38                                 | 15.94                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.82       | 2.41   | 0.04   | 0.00   | 7.65                                 | 16.16                                       |
|                   | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 59.5%  | 36.2%  | -  | 9.3%                                 | 3.6%  |
| c. terme - A1B    | 0.0%           | 78.6%      | 42.6%  | -  | 11.0%  | 4.1%                                 |   |
| c. terme - A2     | 0.0%           | 81.0%      | 37.6%  | -  | 10.9%  | 3.8%                                 |   |
| m. terme - B1     | 0.6%           | 123.8%     | 73.8%  | -  | 16.8%  | 6.6%                                 |   |
| m. terme - A1B    | 0.6%           | 192.9%     | 94.3%  | -  | 22.4%  | 8.1%                                 |   |
| m. terme - A2     | 0.6%           | 190.5%     | 85.1%  | -  | 21.5%  | 7.5%                                 |   |
| l. terme - B1     | 1.1%           | 173.8%     | 102.8%   | -  | 22.0%  | 8.5%                                 |   |
| l. terme - A1B    | 0.6%           | 373.8%     | 153.9%   | -  | 34.4%  | 12.1%                                |   |
| l. terme - A2     | 1.1%           | 473.8%     | 182.3%   | -  | 39.3%  | 13.6%                                |   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S4 - Superstructure SSI

| Durée de vie [an] | Scénario       | Trafic T5  |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
|                   |                | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | ref.1          | 1.72       | 7.16   | 0.01   | 0.00   | 5.43                                 | 10.98                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.73       | 10.36  | 0.01   | 0.00   | 5.94                                 | 11.51                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.73       | 11.25  | 0.01   | 0.00   | 6.05                                 | 11.60                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.72       | 11.38  | 0.01   | 0.00   | 6.05                                 | 11.58                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.73       | 13.67  | 0.02   | 0.00   | 6.39                                 | 11.97                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.73       | 16.84  | 0.02   | 0.00   | 6.71                                 | 12.23                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.73       | 16.46  | 0.02   | 0.00   | 6.65                                 | 12.14                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.74       | 16.10  | 0.02   | 0.00   | 6.68                                 | 12.26                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.74       | 25.57  | 0.02   | 0.00   | 7.37                                 | 12.79                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.74       | 29.92  | 0.02   | 0.00   | 7.65                                 | 13.01                                       |
|                   | ref.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 44.7%  | 45.1%  | -  | 9.6%                                 | 4.9%  |
| c. terme - A1B    | 0.6%           | 57.1%      | 51.5%  | -  | 11.9%  | 5.7%                                 |   |
| c. terme - A2     | 0.0%           | 58.9%      | 48.9%  | -  | 11.5%  | 5.5%                                 |   |
| m. terme - B1     | 0.6%           | 90.9%      | 93.8%  | -  | 17.8%  | 9.0%                                 |   |
| m. terme - A1B    | 0.6%           | 135.2%     | 115.7%   | -  | 23.6%  | 11.4%                                |   |
| m. terme - A2     | 0.6%           | 129.9%     | 109.2%   | -  | 22.5%  | 10.6%                                |   |
| l. terme - B1     | 1.2%           | 124.9%     | 127.2%   | -  | 23.1%  | 11.7%                                |   |
| l. terme - A1B    | 1.2%           | 257.1%     | 188.8%   | -  | 35.9%  | 16.5%                                |   |
| l. terme - A2     | 1.2%           | 317.9%     | 215.8%   | -  | 41.0%  | 18.5%                                |   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S3 - Superstructure SS1

| Trafic T3         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.64       | 9.81   | 0.13   | 0.00   | 1.43                                 | 7.59  |
|                   | c. terme - B1  | 1.63       | 10.32  | 0.14   | 0.00   | 1.57                                 | 7.71  |
|                   | c. terme - A1B | 1.63       | 10.40  | 0.14   | 0.00   | 1.59                                 | 7.71  |
|                   | c. terme - A2  | 1.63       | 10.28  | 0.14   | 0.00   | 1.59                                 | 7.69  |
|                   | m. terme - B1  | 1.63       | 10.85  | 0.15   | 0.00   | 1.68                                 | 7.82  |
|                   | m. terme - A1B | 1.62       | 11.06  | 0.16   | 0.00   | 1.77                                 | 7.85  |
|                   | m. terme - A2  | 1.62       | 10.95  | 0.15   | 0.00   | 1.76                                 | 7.81  |
|                   | l. terme - B1  | 1.63       | 11.23  | 0.16   | 0.00   | 1.76                                 | 7.90  |
|                   | l. terme - A1B | 1.62       | 11.55  | 0.17   | 0.00   | 1.96                                 | 7.97  |
|                   | l. terme - A2  | 1.61       | 11.52  | 0.17   | 0.00   | 2.03                                 | 8.01  |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | -0.6%      | 5.2%   | 7.6%   | -  | 9.7%                                 | 1.6%  |
|                   | c. terme - A1B | -0.6%      | 6.0%   | 8.4%   | -  | 11.6%                                | 1.7%  |
|                   | c. terme - A2  | -0.6%      | 4.8%   | 7.6%   | -  | 11.3%                                | 1.3%  |
|                   | m. terme - B1  | -0.6%      | 10.6%  | 16.0%  | -  | 17.7%                                | 3.1%  |
|                   | m. terme - A1B | -1.2%      | 12.7%  | 18.3%  | -  | 24.0%                                | 3.4%  |
|                   | m. terme - A2  | -1.2%      | 11.6%  | 15.3%  | -  | 23.0%                                | 2.9%  |
|                   | l. terme - B1  | -0.6%      | 14.5%  | 22.9%  | -  | 23.3%                                | 4.2%  |
|                   | l. terme - A1B | -1.2%      | 17.7%  | 26.7%  | -  | 37.1%                                | 5.1%  |
|                   | l. terme - A2  | -1.8%      | 17.4%  | 29.8%  | -  | 42.4%                                | 5.6%  |

| Trafic T4         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.66       | 9.24   | 0.07   | 0.00   | 2.53                                 | 8.76  |
|                   | c. terme - B1  | 1.66       | 10.93  | 0.08   | 0.00   | 2.77                                 | 8.99  |
|                   | c. terme - A1B | 1.66       | 11.40  | 0.09   | 0.00   | 2.82                                 | 9.03  |
|                   | c. terme - A2  | 1.66       | 11.38  | 0.09   | 0.00   | 2.81                                 | 9.00  |
|                   | m. terme - B1  | 1.67       | 12.71  | 0.10   | 0.00   | 2.98                                 | 9.22  |
|                   | m. terme - A1B | 1.66       | 14.03  | 0.10   | 0.00   | 3.13                                 | 9.31  |
|                   | m. terme - A2  | 1.66       | 13.75  | 0.10   | 0.00   | 3.11                                 | 9.26  |
|                   | l. terme - B1  | 1.67       | 13.83  | 0.11   | 0.00   | 3.12                                 | 9.36  |
|                   | l. terme - A1B | 1.66       | 16.48  | 0.12   | 0.00   | 3.47                                 | 9.58  |
|                   | l. terme - A2  | 1.66       | 17.52  | 0.13   | 0.00   | 3.60                                 | 9.68  |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 18.3%  | 17.7%  | -  | 9.5%                                 | 2.7%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.0%       | 23.4%  | 20.5%  | -  | 11.6%                                | 3.1%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.0%       | 23.2%  | 18.9%  | -  | 11.4%                                | 2.8%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 37.6%  | 36.1%  | -  | 17.9%                                | 5.3%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.0%       | 51.8%  | 42.1%  | -  | 24.0%                                | 6.3%  |
|                   | m. terme - A2  | 0.0%       | 48.8%  | 38.3%  | -  | 23.1%                                | 5.8%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.6%       | 49.7%  | 47.6%  | -  | 23.4%                                | 6.9%  |
|                   | l. terme - A1B | 0.0%       | 78.4%  | 65.7%  | -  | 37.1%                                | 9.4%  |
|                   | l. terme - A2  | 0.0%       | 89.6%  | 74.1%  | -  | 42.4%                                | 10.6%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S2 - Superstructure SS2

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.79       | 0.02   | 0.05   | 0.00   | 5.22                                 | 13.62                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.79       | 0.04   | 0.06   | 0.00   | 5.70                                 | 14.12                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.79       | 0.04   | 0.07   | 0.00   | 5.79                                 | 14.18                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.79       | 0.04   | 0.07   | 0.00   | 5.78                                 | 14.13                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.80       | 0.06   | 0.08   | 0.00   | 6.07                                 | 14.71                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.79       | 0.09   | 0.09   | 0.00   | 6.37                                 | 14.71                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.79       | 0.09   | 0.08   | 0.00   | 6.32                                 | 14.63                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.80       | 0.08   | 0.09   | 0.00   | 6.35                                 | 14.78                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.80       | 0.18   | 0.11   | 0.00   | 6.99                                 | 15.25                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.80       | 0.24   | 0.12   | 0.00   | 7.23                                 | 15.45                                       |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.0%       | 100.0%   | 29.3%  | -  | 9.2%                                 | 3.6%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.0%       | 100.0%   | 33.7%  | -  | 10.9%                                | 4.1%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.0%       | 100.0%   | 31.1%  | -  | 10.6%                                | 3.7%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 200.0%   | 59.6%  | -  | 16.3%                                | 6.4%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.0%       | 350.0%   | 71.7%  | -  | 21.9%                                | 8.0%  |
|                   | m. terme - A2  | 0.0%       | 350.0%   | 66.1%  | -  | 21.1%                                | 7.4%  |
|                   | l. terme - B1  | 0.6%       | 300.0%   | 81.7%  | -  | 21.7%                                | 8.5%  |
|                   | l. terme - A1B | 0.6%       | 800.0%   | 112.9%   | -  | 33.8%                                | 11.9%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 0.6%       | 1100.0%  | 130.9%   | -  | 38.5%                                | 13.4%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S3 - Superstructure SS1

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.75       | 3.39   | 0.01   | 0.00   | 5.43                                 | 12.17                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.76       | 5.15   | 0.02   | 0.00   | 5.95                                 | 12.70                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.76       | 5.64   | 0.02   | 0.00   | 6.05                                 | 12.78                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.75       | 5.72   | 0.02   | 0.00   | 6.04                                 | 12.75                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.76       | 6.97   | 0.02   | 0.00   | 6.38                                 | 13.14                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.76       | 8.83   | 0.02   | 0.00   | 6.69                                 | 13.38                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.76       | 8.69   | 0.02   | 0.00   | 6.54                                 | 13.30                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.77       | 8.35   | 0.03   | 0.00   | 6.66                                 | 13.43                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.76       | 13.26  | 0.03   | 0.00   | 7.34                                 | 13.98                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.77       | 15.63  | 0.04   | 0.00   | 7.61                                 | 14.21                                       |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 51.9%  | 38.5%  | -  | 9.6%                                 | 4.4%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | 66.4%  | 47.5%  | -  | 11.5%                                | 5.0%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | 68.7%  | 41.8%  | -  | 11.3%                                | 4.8%  |
|                   | m. terme - B1  | 0.6%       | 105.6%   | 81.1%  | -  | 17.4%                                | 8.0%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.6%       | 160.5%   | 102.5%   | -  | 23.2%                                | 10.0%                                       |
|                   | m. terme - A2  | 0.6%       | 156.3%   | 95.1%  | -  | 22.3%                                | 9.3%  |
|                   | l. terme - B1  | 1.1%       | 146.3%   | 109.8%   | -  | 22.7%                                | 10.4%                                       |
|                   | l. terme - A1B | 0.6%       | 291.2%   | 168.0%   | -  | 35.3%                                | 14.9%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.1%       | 361.1%   | 196.7%   | -  | 40.2%                                | 16.8%                                       |

| Trafic T6         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.82       | 0.08   | 0.00   | 0.00   | 8.48                                 | 15.05                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.83       | 0.14   | 0.00   | 0.00   | 9.26                                 | 15.85                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.83       | 0.17   | 0.00   | 0.00   | 9.41                                 | 15.98                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.83       | 0.17   | 0.00   | 0.00   | 9.39                                 | 15.94                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.85       | 0.24   | 0.00   | 0.00   | 9.91                                 | 16.51                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.85       | 0.36   | 0.00   | 0.00   | 10.38                                | 16.92                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.84       | 0.36   | 0.00   | 0.00   | 10.29                                | 16.81                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.85       | 0.32   | 0.00   | 0.00   | 10.35                                | 16.96                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.86       | 0.75   | 0.00   | 0.00   | 11.36                                | 17.86                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.87       | 1.01   | 0.00   | 0.00   | 11.76                                | 18.22                                       |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.5%       | 75.0%  | 117.7%   | -  | 9.2%                                 | 5.3%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.5%       | 112.5%   | 148.8%   | -  | 10.9%                                | 6.2%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.5%       | 112.5%   | 103.9%   | -  | 10.7%                                | 5.9%  |
|                   | m. terme - B1  | 1.6%       | 200.0%   | 313.8%   | -  | 16.8%                                | 9.7%  |
|                   | m. terme - A1B | 1.6%       | 350.0%   | 390.1%   | -  | 22.4%                                | 12.5%                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.1%       | 350.0%   | 365.5%   | -  | 21.4%                                | 11.7%                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.6%       | 300.0%   | 469.0%   | -  | 22.0%                                | 12.7%                                       |
|                   | l. terme - A1B | 2.2%       | 637.5%   | 774.4%   | -  | 34.0%                                | 18.7%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 2.7%       | 1162.5%  | 1008.4%  | -  | 38.0%                                | 21.1%                                       |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Sion  
 Sol S4 - Superstructure SS2

| Trafic T5         |                |            |  |  |  |                                      |   |
|-------------------|----------------|------------|--|--|--|--------------------------------------|---|
| Durée de vie [an] | Scénario       | IRI [m/km] | AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [m/km] | AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [%] | AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/km] | Permanent Deformation (AC Only) [mm] | Permanent Deformation (Total Pavement) [mm] |
| 20                | réf.1          | 1.75       | 4.45   | 0.46   | 0.00   | 5.29                                 | 12.26                                       |
|                   | c. terme - B1  | 1.76       | 7.90   | 0.57   | 0.00   | 5.81                                 | 12.71                                       |
|                   | c. terme - A1B | 1.76       | 8.75   | 0.59   | 0.00   | 5.90                                 | 12.79                                       |
|                   | c. terme - A2  | 1.76       | 8.79   | 0.59   | 0.00   | 5.89                                 | 12.76                                       |
|                   | m. terme - B1  | 1.77       | 11.46  | 0.71   | 0.00   | 6.20                                 | 13.14                                       |
|                   | m. terme - A1B | 1.76       | 15.38  | 0.80   | 0.00   | 6.50                                 | 13.39                                       |
|                   | m. terme - A2  | 1.76       | 15.13  | 0.77   | 0.00   | 6.45                                 | 13.32                                       |
|                   | l. terme - B1  | 1.77       | 14.45  | 0.81   | 0.00   | 6.48                                 | 13.44                                       |
|                   | l. terme - A1B | 1.77       | 26.14  | 1.04   | 0.00   | 7.12                                 | 13.99                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.78       | 34.28  | 1.15   | 0.00   | 7.39                                 | 14.22                                       |
| 20                | réf.1          | 0.0%       | 0.0%   | 0.0%   | -  | 0.0%                                 | 0.0%  |
|                   | c. terme - B1  | 0.6%       | 77.5%  | 23.9%  | -  | 9.8%                                 | 3.6%  |
|                   | c. terme - A1B | 0.6%       | 96.6%  | 29.2%  | -  | 11.5%                                | 4.3%  |
|                   | c. terme - A2  | 0.6%       | 97.5%  | 28.5%  | -  | 11.2%                                | 4.1%  |
|                   | m. terme - B1  | 1.1%       | 157.5%   | 55.9%  | -  | 17.1%                                | 7.1%  |
|                   | m. terme - A1B | 0.6%       | 245.0%   | 75.7%  | -  | 22.8%                                | 9.2%  |
|                   | m. terme - A2  | 0.6%       | 240.0%   | 69.7%  | -  | 21.9%                                | 8.6%  |
|                   | l. terme - B1  | 1.1%       | 224.7%   | 78.5%  | -  | 22.4%                                | 9.6%  |
|                   | l. terme - A1B | 1.1%       | 487.4%   | 128.1%   | -  | 34.4%                                | 14.1%                                       |
|                   | l. terme - A2  | 1.7%       | 670.3%   | 152.2%   | -  | 39.5%                                | 16.0%                                       |













Annexes

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S3 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S4 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S4 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S4 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARwin-ME
Simplon
Sol S4 - Superstructure SSS

Table with 10 columns: Durée de vie [an], Scénario, IRI [m/km], AC Surface Down Cracking (Long Cracking) [m/m], AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [m/m], AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) [m/m], Permanent Deformation (AC Only) [mm], Permanent Deformation (Total Pavement) [mm], CMS Fatigue Cracking [%].

















### 10.3.3. Résultats détaillés de l'évaluation de durée de vie

#### 10.3.3.1. Orniérage total

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| Modèle DARWin-ME   |       |       |       |
| Durée de vie - Permanent Deformation (Total Pavement) [an]                 |       |       |       |
| Sols S2 à S4 - Superstructure SS1  |       |       |       |
| <b>S2 - T5</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 35.29 | 14.87 | 22.03 |
| c. terme - B1  | 31.95 | 12.91 | 20.25 |
| c. terme - A2  | 31.50 | 12.85 | 20.13 |
| m. terme - B1  | 30.61 | 11.92 | 19.08 |
| m. terme - A2  | 28.85 | 12.04 | 18.44 |
| l. terme - B1  | 29.92 | 11.63 | 18.48 |
| l. terme - A2  | 24.55 | 10.15 | 16.03 |
| <b>S2 - T6</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 25.21 | 8.17  | 13.34 |
| c. terme - B1  | 22.46 | 7.17  | 12.00 |
| c. terme - A2  | 22.28 | 7.08  | 12.16 |
| m. terme - B1  | 21.24 | 6.17  | 11.14 |
| m. terme - A2  | 20.06 | 6.17  | 10.74 |
| l. terme - B1  | 20.71 | 6.17  | 10.45 |
| l. terme - A2  | 15.94 | 5.17  | 9.08  |
| <b>S3 - T5</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 50.80 | 21.56 | 31.08 |
| c. terme - B1  | 45.68 | 18.82 | 28.64 |
| c. terme - A2  | 44.91 | 18.67 | 28.15 |
| m. terme - B1  | 43.88 | 17.72 | 26.88 |
| m. terme - A2  | 40.82 | 17.33 | 25.58 |
| l. terme - B1  | 42.79 | 17.24 | 26.39 |
| l. terme - A2  | 35.03 | 14.88 | 22.58 |
| <b>S3 - T6</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 36.44 | 12.65 | 20.10 |
| c. terme - B1  | 32.31 | 10.73 | 18.16 |
| c. terme - A2  | 31.87 | 10.71 | 18.01 |
| m. terme - B1  | 30.76 | 10.08 | 16.88 |
| m. terme - A2  | 28.74 | 10.08 | 16.17 |
| l. terme - B1  | 29.93 | 9.42  | 16.16 |
| l. terme - A2  | 23.72 | 8.17  | 13.58 |
| <b>S4 - T5</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 59.68 | 26.10 | 37.29 |
| c. terme - B1  | 53.63 | 22.66 | 34.41 |
| c. terme - A2  | 52.63 | 22.43 | 33.49 |
| m. terme - B1  | 51.54 | 21.56 | 32.09 |
| m. terme - A2  | 47.94 | 20.91 | 30.41 |
| l. terme - B1  | 50.23 | 20.98 | 31.45 |
| l. terme - A2  | 41.83 | 17.91 | 26.92 |
| <b>S4 - T6</b>   |       |       |       |
| Scénario   | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1  | 41.97 | 15.15 | 23.51 |
| c. terme - B1  | 37.09 | 12.91 | 21.32 |
| c. terme - A2  | 36.51 | 12.85 | 20.99 |
| m. terme - B1  | 35.35 | 11.76 | 19.80 |
| m. terme - A2  | 32.91 | 11.76 | 18.88 |
| l. terme - B1  | 34.37 | 11.47 | 19.09 |
| l. terme - A2  | 27.50 | 10.08 | 15.97 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - Permanent Deformation (Total Pavement) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS2

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 39.34 | 16.95 | 24.56 |
| c. terme - B1 | 35.67 | 14.78 | 22.71 |
| c. terme - A2 | 35.18 | 14.74 | 22.43 |
| m. terme - B1 | 34.27 | 13.80 | 21.40 |
| m. terme - A2 | 32.19 | 13.72 | 20.62 |
| l. terme - B1 | 33.39 | 13.46 | 20.81 |
| l. terme - A2 | 27.38 | 11.55 | 18.03 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 41.55 | 16.68 | 24.76 |
| c. terme - B1 | 37.15 | 14.42 | 22.66 |
| c. terme - A2 | 36.57 | 14.39 | 22.32 |
| m. terme - B1 | 35.56 | 13.30 | 21.20 |
| m. terme - A2 | 33.21 | 13.34 | 20.28 |
| l. terme - B1 | 34.61 | 13.11 | 20.56 |
| l. terme - A2 | 27.99 | 11.26 | 17.59 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 50.11 | 21.45 | 31.01 |
| c. terme - B1 | 45.17 | 18.68 | 28.37 |
| c. terme - A2 | 44.42 | 18.60 | 27.85 |
| m. terme - B1 | 43.42 | 17.64 | 26.65 |
| m. terme - A2 | 40.71 | 17.20 | 25.45 |
| l. terme - B1 | 42.34 | 17.20 | 26.02 |
| l. terme - A2 | 34.75 | 14.64 | 22.42 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 45.97 | 17.85 | 26.81 |
| c. terme - B1 | 40.96 | 15.35 | 24.31 |
| c. terme - A2 | 40.30 | 15.28 | 23.87 |
| m. terme - B1 | 39.20 | 14.28 | 22.69 |
| m. terme - A2 | 36.52 | 14.15 | 21.63 |
| l. terme - B1 | 38.13 | 13.92 | 21.98 |
| l. terme - A2 | 30.63 | 11.95 | 18.75 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 49.69 | 22.21 | 31.14 |
| c. terme - B1 | 44.64 | 19.47 | 28.50 |
| c. terme - A2 | 43.81 | 19.36 | 28.14 |
| m. terme - B1 | 42.67 | 18.44 | 27.08 |
| m. terme - A2 | 40.84 | 17.91 | 25.95 |
| l. terme - B1 | 42.01 | 17.90 | 26.59 |
| l. terme - A2 | 35.34 | 15.24 | 22.88 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 44.67 | 18.14 | 26.53 |
| c. terme - B1 | 40.03 | 15.65 | 24.28 |
| c. terme - A2 | 39.52 | 15.59 | 23.80 |
| m. terme - B1 | 38.50 | 14.56 | 22.84 |
| m. terme - A2 | 36.46 | 14.33 | 21.76 |
| l. terme - B1 | 37.88 | 14.18 | 22.12 |
| l. terme - A2 | 30.86 | 12.08 | 18.77 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - Permanent Deformation (Total Pavement) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS5

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 42.28 | 16.30 | 24.85 |
| c. terme - B1 | 38.07 | 13.88 | 22.56 |
| c. terme - A2 | 37.41 | 13.82 | 22.23 |
| m. terme - B1 | 36.23 | 12.68 | 20.88 |
| m. terme - A2 | 33.67 | 12.53 | 19.79 |
| l. terme - B1 | 35.22 | 12.29 | 20.10 |
| l. terme - A2 | 28.35 | 10.25 | 16.77 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 22.80 | 6.25  | 11.08 |
| c. terme - B1 | 20.32 | 5.25  | 10.08 |
| c. terme - A2 | 20.20 | 5.25  | 10.17 |
| m. terme - B1 | 19.13 | 5.08  | 9.17  |
| m. terme - A2 | 18.00 | 5.00  | 8.92  |
| l. terme - B1 | 18.61 | 5.00  | 8.28  |
| l. terme - A2 | 13.89 | 4.08  | 7.08  |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 46.01 | 18.79 | 27.35 |
| c. terme - B1 | 41.74 | 16.07 | 25.54 |
| c. terme - A2 | 40.83 | 15.98 | 25.04 |
| m. terme - B1 | 39.77 | 14.90 | 23.67 |
| m. terme - A2 | 36.89 | 14.58 | 22.31 |
| l. terme - B1 | 38.61 | 14.44 | 22.86 |
| l. terme - A2 | 31.74 | 12.10 | 19.11 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 26.08 | 8.08  | 13.28 |
| c. terme - B1 | 23.25 | 7.00  | 11.85 |
| c. terme - A2 | 23.08 | 6.33  | 11.95 |
| m. terme - B1 | 21.97 | 6.08  | 10.84 |
| m. terme - A2 | 20.60 | 6.08  | 10.54 |
| l. terme - B1 | 21.36 | 6.08  | 10.07 |
| l. terme - A2 | 16.39 | 5.00  | 8.25  |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 50.02 | 20.83 | 29.98 |
| c. terme - B1 | 44.41 | 17.83 | 27.95 |
| c. terme - A2 | 43.84 | 17.71 | 27.39 |
| m. terme - B1 | 43.15 | 16.65 | 25.96 |
| m. terme - A2 | 40.00 | 16.19 | 24.47 |
| l. terme - B1 | 41.97 | 16.13 | 25.16 |
| l. terme - A2 | 34.62 | 13.53 | 21.08 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | 27.54 | 9.00  | 14.40 |
| c. terme - B1 | 24.59 | 7.25  | 12.95 |
| c. terme - A2 | 24.42 | 7.17  | 13.00 |
| m. terme - B1 | 23.37 | 6.33  | 11.92 |
| m. terme - A2 | 21.89 | 6.33  | 11.49 |
| l. terme - B1 | 22.73 | 6.25  | 11.10 |
| l. terme - A2 | 17.70 | 5.17  | 9.17  |



## 10.3.3.2. Fissuration par fatigue du haut vers le bas

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Modèle DARWin-ME

## Durée de vie - AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [an]

## Sols S2 à S4 - Superstructure SS1

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | 84.05 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | 83.36 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | 85.11 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | 76.05 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | 79.12 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 60.63 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 44.28 | 84.90 |
| c. terme - B1 | > 100 | 34.69 | 67.29 |
| c. terme - A2 | > 100 | 34.70 | 61.25 |
| m. terme - B1 | > 100 | 33.76 | 57.81 |
| m. terme - A2 | > 100 | 31.39 | 51.84 |
| l. terme - B1 | > 100 | 32.34 | 57.12 |
| l. terme - A2 | 93.55 | 25.93 | 43.42 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 74.83 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 31.65 | 55.24 |
| c. terme - B1 | > 100 | 26.14 | 47.16 |
| c. terme - A2 | > 100 | 25.80 | 44.16 |
| m. terme - B1 | > 100 | 24.69 | 41.51 |
| m. terme - A2 | 85.37 | 23.47 | 37.45 |
| l. terme - B1 | 98.17 | 23.75 | 40.71 |
| l. terme - A2 | 65.66 | 19.96 | 31.54 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | 73.39 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | 71.03 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | 72.66 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | 60.52 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | 68.19 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 45.94 | 98.22 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS2

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 50.83 | 96.49 |
| c. terme - B1 | > 100 | 40.32 | 77.98 |
| c. terme - A2 | > 100 | 39.56 | 70.56 |
| m. terme - B1 | > 100 | 38.39 | 67.09 |
| m. terme - A2 | > 100 | 35.10 | 58.20 |
| l. terme - B1 | > 100 | 36.54 | 67.49 |
| l. terme - A2 | > 100 | 28.74 | 49.08 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 36.31 | 87.20 |
| c. terme - B1 | > 100 | 27.15 | 65.47 |
| c. terme - A2 | > 100 | 26.15 | 55.74 |
| m. terme - B1 | > 100 | 24.55 | 51.56 |
| m. terme - A2 | > 100 | 22.33 | 42.94 |
| l. terme - B1 | > 100 | 23.12 | 51.11 |
| l. terme - A2 | 96.90 | 16.65 | 33.74 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 86.13 | > 100 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS5

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | 77.53 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | 74.39 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | 74.75 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | 63.48 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | 69.99 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 48.25 | 91.97 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 26.23 | 43.30 |
| c. terme - B1 | 87.36 | 21.51 | 38.06 |
| c. terme - A2 | 83.58 | 21.10 | 36.38 |
| m. terme - B1 | 81.85 | 19.74 | 34.01 |
| m. terme - A2 | 67.25 | 18.37 | 30.52 |
| l. terme - B1 | 75.67 | 18.71 | 32.68 |
| l. terme - A2 | 53.62 | 14.48 | 24.58 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 61.37 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | 47.00 | 90.46 |
| c. terme - A2 | > 100 | 45.24 | 82.31 |
| m. terme - B1 | > 100 | 44.02 | 78.52 |
| m. terme - A2 | > 100 | 38.33 | 65.85 |
| l. terme - B1 | > 100 | 41.20 | 77.05 |
| l. terme - A2 | > 100 | 29.12 | 53.33 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 71.45 | > 100 |

## 10.3.3.3. Fissuration par fatigue du bas vers le haut

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

## Modèle DARWin-ME

## Durée de vie - AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [an]

## Sols S2 à S4 - Superstructure SS1

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS2

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 99.55 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | 86.69 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | 87.73 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | 89.05 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | 82.05 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | 85.41 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 69.56 | > 100 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | 46.13 | 84.88 |
| c. terme - B1 | > 100 | 36.27 | 72.80 |
| c. terme - A2 | > 100 | 35.92 | 67.87 |
| m. terme - B1 | > 100 | 34.65 | 63.45 |
| m. terme - A2 | > 100 | 32.63 | 56.99 |
| l. terme - B1 | > 100 | 33.11 | 65.04 |
| l. terme - A2 | > 100 | 26.44 | 48.91 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | 91.58 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | 66.17 | > 100 |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS5

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

## 10.3.3.4. Fissuration par fatigue dans les couches stabilisées

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Durée de vie - CSM Cracking [an]

Sols S2 à S4 - Superstructure SS5

| S2 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S2 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S3 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T5       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

| S4 - T6       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|
| Scénario      | 99000 | 99100 | 99300 |
| réf.1         | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| c. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| m. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - B1 | > 100 | > 100 | > 100 |
| l. terme - A2 | > 100 | > 100 | > 100 |

## 10.4. Analyse de risque – Détermination des catégories de risque

### 10.4.1. Première approche

#### 10.4.1.1. Région "froide"

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |                 |             |                 |             |                 |             |
|--|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Modèle DARWin-ME   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Analyse de risque - Catégorie de risque                                    |                 |             |                 |             |                 |             |
| Région "froide"  |                 |             |                 |             |                 |             |
| <b>Trafic T3</b>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <b>Trafic T4</b>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <b>Trafic T5</b>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 0.0%            | 34.9 ans    | 0.0%            | 43.7 ans    | 0.0%            | 47 ans      |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 0.0%            | 32.6 ans    | 0.0%            | 40.9 ans    | 0.0%            | 44.4 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 0.0%            | 29.5 ans    | 0.0%            | 37.3 ans    | 0.0%            | 40.8 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <b>Trafic T6</b>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 11.1%           | 26.4 ans    | 0.0%            | 31.9 ans    | 0.0%            | 33.6 ans    |
|  | Improbable      | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 33.3%           | 24.5 ans    | 0.0%            | 29.6 ans    | 0.0%            | 31.4 ans    |
|  | Probable        | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Faible          |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 55.6%           | 21.6 ans    | 22.2%           | 26.5 ans    | 22.2%           | 28.3 ans    |
|  | Probable        | Faible      | Improbable      | Faible      | Improbable      | Faible      |
|  | Faible          |             | Très faible     |             | Très faible     |             |



## 10.4.1.2. Région "intermédiaire"

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |                 |             |                 |             |                 |             |
|--|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Modèle DARWin-ME   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Analyse de risque - Catégorie de risque                                    |                 |             |                 |             |                 |             |
| Région "intermédiaire"   |                 |             |                 |             |                 |             |
| <i>Trafic T3</i>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <i>Trafic T4</i>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <i>Trafic T5</i>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 11.1%           | 21.6 ans    | 0.0%            | 27.1 ans    | 0.0%            | 29.8 ans    |
|  | Improbable      | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme  | 55.6%           | 19.9 ans    | 0.0%            | 24.9 ans    | 0.0%            | 27.5 ans    |
|  | Probable        | Moyenne     | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Moyenne         |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme   | 77.8%           | 18.3 ans    | 11.1%           | 23.0 ans    | 0.0%            | 25.5 ans    |
|  | Très probable   | Moyenne     | Improbable      | Faible      | Très improbable | Faible      |
|  | Elevée          |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| <i>Trafic T6</i>   |                 |             |                 |             |                 |             |
| Scénario   | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme  | 66.7%           | 14.9 ans    | 66.7%           | 18.0 ans    | 33.3%           | 19.3 ans    |
|  | Très probable   | Grave       | Très probable   | Moyenne     | Probable        | Moyenne     |
|  | Très élevée     |             | Elevée          |             | Moyenne         |             |
| moyen-terme  | 66.7%           | 13.4 ans    | 66.7%           | 16.3 ans    | 66.7%           | 17.6 ans    |
|  | Très probable   | Grave       | Très probable   | Moyenne     | Très probable   | Moyenne     |
|  | Très élevée     |             | Elevée          |             | Elevée          |             |
| long-terme   | 88.9%           | 12.0 ans    | 88.9%           | 14.7 ans    | 88.9%           | 15.9 ans    |
|  | Très probable   | Grave       | Très probable   | Grave       | Très probable   | Moyenne     |
|  | Très élevée     |             | Très élevée     |             | Elevée          |             |

10.4.1.3. Région "chaude"

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "chaude"**

| <i>Trafic T3</i> |                 |             |                 |             |                 |             |
|------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|                  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme      | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme      | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme       | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |

| <i>Trafic T4</i> |                 |             |                 |             |                 |             |
|------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|                  | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme      | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme      | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme       | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    | 0.0%            | > 20 ans    |
|                  | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|                  | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |

| <i>Trafic T5</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 100.0%        | 13.9 ans    | 100.0%        | 17.8 ans    | 66.7%         | 19.9 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 12.8 ans    | 100.0%        | 16.5 ans    | 66.7%         | 18.5 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme       | 100.0%        | 11.4 ans    | 100.0%        | 14.9 ans    | 88.9%         | 16.8 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |

| <i>Trafic T6</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 100.0%        | 9.0 ans     | 100.0%        | 11.0 ans    | 100.0%        | 12.0 ans    |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 8.2 ans     | 100.0%        | 10.1 ans    | 100.0%        | 10.8 ans    |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme       | 100.0%        | 7.3 ans     | 100.0%        | 9.0 ans     | 100.0%        | 9.8 ans     |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

## 10.4.2. Deuxième approche

|   |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |  |  |  |  |  |  |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>   |  |  |  |  |  |  |
| <b>Analyse de risque - Catégorie de risque</b>                                    |  |  |  |  |  |  |
| <b>3 régions climatiques</b>  |  |  |  |  |  |  |

| Scénario    | Région "froide" |             | Région "intermédiaire" |             | Région "chaude" |             |
|-------------|-----------------|-------------|------------------------|-------------|-----------------|-------------|
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité            | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 1.9%            | 36.2 ans    | 33.3%                  | 21.8 ans    | 94.4%           | 14.0 ans    |
|             | Improbable      | Faible      | Probable               | Faible      | Très probable   | Grave       |
|             | Très faible     |             | Faible                 |             | Très élevée     |             |
| moyen-terme | 5.6%            | 33.9 ans    | 42.6%                  | 19.9 ans    | 94.4%           | 12.8 ans    |
|             | Improbable      | Faible      | Probable               | Moyenne     | Très probable   | Grave       |
|             | Très faible     |             | Moyenne                |             | Très élevée     |             |
| long-terme  | 16.7%           | 30.7 ans    | 66.7%                  | 18.2 ans    | 98.1%           | 11.5 ans    |
|             | Improbable      | Faible      | Très probable          | Moyenne     | Très probable   | Grave       |
|             | Très faible     |             | Elevée                 |             | Très élevée     |             |

## 10.5. Mesures d'adaptation

### 10.5.1. Mesure 1 : Changement du type de superstructure

#### 10.5.1.1. Analyse de risque

|   |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |  |  |  |  |  |  |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Mesure d'adaptation 1</i>  |  |  |  |  |  |  |
| <i>Analyse de risque - Catégorie de risque</i>                                    |  |  |  |  |  |  |
| <i>Région "intermédiaire"</i>   |  |  |  |  |  |  |

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 22.5 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             |             |             |             |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 20.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             |             |             |             |             |
| long-terme  | 66.7%           | 19.3 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très probable   | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|             | Moyenne         |             |             |             |             |             |

| Trafic T6   |                 |             |                 |             |                 |             |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 22.4 ans    | 0.0%            | 23.9 ans    | 0.0%            | 23.9 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 20.6 ans    | 0.0%            | 22.0 ans    | 0.0%            | 22.1 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme  | 66.7%           | 18.9 ans    | 66.7%           | 20.2 ans    | 66.7%           | 20.3 ans    |
|             | Très probable   | Moyenne     | Très probable   | Faible      | Très probable   | Faible      |
|             | Moyenne         |             | Moyenne         |             | Moyenne         |             |

|   |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |  |  |  |  |  |  |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Mesure d'adaptation 1</i>  |  |  |  |  |  |  |
| <i>Analyse de risque - Catégorie de risque</i>                                    |  |  |  |  |  |  |
| <i>Région "chaude"</i>  |  |  |  |  |  |  |

| Trafic T5   |               |             |               |             |                 |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.8 ans    | 100.0%        | 18.8 ans    | 0.0%            | 22.6 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Très faible     |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 13.8 ans    | 100.0%        | 17.5 ans    | 0.0%            | 21.1 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Très faible     |             |
| long-terme  | 100.0%        | 12.3 ans    | 100.0%        | 15.9 ans    | 66.7%           | 19.3 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable   | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée          |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.5 ans    | 100.0%        | 15.4 ans    | 100.0%        | 15.7 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 13.4 ans    | 100.0%        | 14.2 ans    | 100.0%        | 14.4 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 12.0 ans    | 100.0%        | 12.8 ans    | 100.0%        | 13.0 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

10.5.2. Mesure 2 : Adaptation de la portance du sol de fondation

10.5.2.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S2 - Superstructure SS1  |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 22.16     | 48.03    | 425.85   | 31.95     | 86.08    | 929.54   |
| c. terme - B1  | 19.22     | 39.15    | 293.89   | 29.42     | 71.02    | 793.97   |
| c. terme - A1B | 19.12     | 38.97    | 296.17   | 29.11     | 67.99    | 685.52   |
| c. terme - A2  | 19.03     | 38.78    | 298.46   | 28.80     | 64.96    | 577.08   |
| m. terme - B1  | 18.13     | 37.80    | 340.47   | 27.51     | 61.71    | 535.87   |
| m. terme - A1B | 17.95     | 36.66    | 309.01   | 26.89     | 58.36    | 504.31   |
| m. terme - A2  | 17.77     | 35.53    | 277.55   | 26.27     | 55.01    | 472.75   |
| l. terme - B1  | 17.69     | 36.07    | 322.90   | 26.93     | 62.02    | 688.59   |
| l. terme - A1B | 16.43     | 33.11    | 270.86   | 25.01     | 55.03    | 578.60   |
| l. terme - A2  | 15.16     | 30.15    | 218.82   | 23.09     | 48.03    | 468.62   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S3 - Superstructure SS1  |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.67     | 32.08    | 426.17   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 22.35     | 26.25    | 296.32   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 22.22     | 26.17    | 298.40   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 22.09     | 26.10    | 300.48   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 21.18     | 25.07    | 343.46   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 20.85     | 24.50    | 310.04   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 20.53     | 23.94    | 276.62   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 20.59     | 24.22    | 320.42   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 19.11     | 22.27    | 267.13   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.63     | 20.32    | 213.85   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 12.62     | 184.88   | 1483.53  | 20.09     | 408.81   | 7060.83  |
| c. terme - B1  | 10.71     | 127.22   | 708.66   | 18.16     | 372.97   | 13068.84 |
| c. terme - A1B | 10.65     | 124.84   | 766.90   | 18.08     | 315.18   | 7380.25  |
| c. terme - A2  | 10.60     | 122.46   | 825.14   | 18.01     | 257.39   | 1691.67  |
| m. terme - B1  | 9.92      | 134.71   | 1105.42  | 16.91     | 238.72   | 1265.24  |
| m. terme - A1B | 9.92      | 119.11   | 924.21   | 16.49     | 215.41   | 1203.02  |
| m. terme - A2  | 9.92      | 103.51   | 742.99   | 16.08     | 192.11   | 1140.80  |
| l. terme - B1  | 9.25      | 121.62   | 1061.74  | 16.16     | 316.78   | 3401.28  |
| l. terme - A1B | 8.71      | 97.90    | 772.55   | 14.80     | 240.94   | 2496.69  |
| l. terme - A2  | 8.17      | 74.17    | 483.37   | 13.45     | 165.11   | 1592.10  |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.26     | 109.70   | 1540.70  | 23.69     | 259.87   | 13608.27 |
| c. terme - B1  | 12.98     | 76.27    | 743.35   | 21.49     | 198.97   | 28290.27 |
| c. terme - A1B | 12.95     | 74.94    | 778.41   | 21.31     | 173.56   | 14774.54 |
| c. terme - A2  | 12.92     | 73.61    | 813.46   | 21.14     | 148.14   | 1258.80  |
| m. terme - B1  | 11.84     | 75.73    | 1168.72  | 19.95     | 144.16   | 1069.15  |
| m. terme - A1B | 11.84     | 69.31    | 965.27   | 19.47     | 129.61   | 1103.35  |
| m. terme - A2  | 11.84     | 62.88    | 761.81   | 19.00     | 115.06   | 1137.55  |
| l. terme - B1  | 11.55     | 71.26    | 1079.88  | 19.22     | 158.84   | 4301.06  |
| l. terme - A1B | 10.82     | 59.09    | 784.04   | 17.66     | 128.02   | 3001.63  |
| l. terme - A2  | 10.08     | 46.93    | 488.19   | 16.11     | 97.20    | 1702.21  |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S2 - Superstructure SS2  |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 24.86     | 114.74   | 233.79   | 35.57     | 243.40   | 476.60   |
| c. terme - B1  | 21.66     | 85.70    | 173.21   | 32.51     | 187.59   | 412.09   |
| c. terme - A1B | 21.59     | 84.60    | 173.49   | 32.15     | 171.26   | 370.32   |
| c. terme - A2  | 21.52     | 83.49    | 173.77   | 31.79     | 154.93   | 328.55   |
| m. terme - B1  | 20.58     | 84.43    | 187.79   | 30.53     | 150.60   | 306.97   |
| m. terme - A1B | 20.26     | 79.13    | 176.86   | 29.79     | 137.06   | 291.76   |
| m. terme - A2  | 19.94     | 73.83    | 165.92   | 29.05     | 123.52   | 276.56   |
| l. terme - B1  | 20.06     | 79.76    | 176.31   | 29.88     | 160.16   | 365.06   |
| l. terme - A1B | 18.51     | 68.88    | 154.45   | 27.77     | 136.38   | 313.76   |
| l. terme - A2  | 16.96     | 58.00    | 132.60   | 25.66     | 112.61   | 262.47   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S3 - Superstructure SS2  |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.44     | 36.11    | 139.60   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 22.14     | 29.82    | 106.96   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 22.05     | 29.59    | 107.49   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 21.96     | 29.35    | 108.03   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 21.07     | 28.25    | 112.49   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 20.72     | 27.42    | 107.16   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 20.37     | 26.59    | 101.84   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 20.51     | 27.06    | 106.34   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 18.90     | 24.70    | 95.07    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.29     | 22.34    | 83.79    | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 24.24     | -        | 1924.79  | 35.18     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 21.02     | -        | 748.44   | 32.02     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 20.95     | -        | 908.96   | 31.63     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 20.88     | -        | 1069.47  | 31.23     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 19.91     | -        | 1490.47  | 29.93     | -        | 343.21   |
| m. terme - A1B | 19.65     | -        | 1200.54  | 29.14     | -        | 580.42   |
| m. terme - A2  | 19.39     | -        | 910.61   | 28.35     | -        | 817.62   |
| l. terme - B1  | 19.45     | -        | 1563.00  | 29.25     | -        | 13401.93 |
| l. terme - A1B | 18.03     | -        | 1033.03  | 27.11     | -        | 8288.45  |
| l. terme - A2  | 16.61     | 1698.97  | 503.06   | 24.97     | -        | 3174.98  |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.10     | 180.84   | 642.72   | 31.29     | 424.73   | 3055.55  |
| c. terme - B1  | 18.16     | 115.87   | 364.32   | 28.38     | 368.53   | 6901.08  |
| c. terme - A1B | 18.09     | 114.34   | 381.57   | 28.07     | 303.12   | 3821.42  |
| c. terme - A2  | 18.03     | 112.81   | 398.83   | 27.75     | 237.71   | 741.76   |
| m. terme - B1  | 17.05     | 120.94   | 468.29   | 26.46     | 234.01   | 628.48   |
| m. terme - A1B | 16.88     | 107.19   | 414.33   | 25.80     | 201.14   | 610.51   |
| m. terme - A2  | 16.70     | 93.44    | 360.38   | 25.14     | 168.27   | 592.55   |
| l. terme - B1  | 16.61     | 112.72   | 453.10   | 25.80     | 279.30   | 1605.77  |
| l. terme - A1B | 15.39     | 89.55    | 350.40   | 23.84     | 217.11   | 1184.07  |
| l. terme - A2  | 14.17     | 66.39    | 247.71   | 21.88     | 154.92   | 762.37   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |           |          |          |        |           |          |          |        |                | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
|--|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|----------------|--|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |           |          |          |        |           |          |          |        |                | Modèle DARWin-ME   |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |           |          |          |        |           |          |          |        |                | Mesure d'adaptation 2  |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| Durée de vie [an]  |           |          |          |        |           |          |          |        |                | Durée de vie [an]  |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| Sol S2 - Superstructure S55  |           |          |          |        |           |          |          |        |                | Sol S3 - Superstructure S55  |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| T5   |           |          |          |        |           |          |          |        |                |  |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| 99100  |           |          |          |        | 99300     |          |          |        |                | 99100  |          |          |        |           | 99300    |          |        |  |  |
| Scénario   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Scénario       | Orniérage  | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |  |  |
| réf.1  | 20.98     | 80.75    | -        | 291.78 | 31.30     | 143.18   | -        | 291.34 | réf.1          | 21.84  | 412.18   | -        | 295.33 | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |  |  |
| c. terme - B1  | 17.85     | 61.12    | -        | 291.86 | 28.71     | 117.25   | -        | 291.28 | c. terme - B1  | 18.62  | 265.37   | -        | 295.10 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| c. terme - A1B   | 17.79     | 59.97    | -        | 291.77 | 28.36     | 111.91   | -        | 291.25 | c. terme - A1B | 18.55  | 253.26   | -        | 294.95 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| c. terme - A2  | 17.72     | 58.82    | -        | 291.68 | 28.01     | 106.57   | -        | 291.22 | c. terme - A2  | 18.48  | 241.15   | -        | 294.80 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| m. terme - B1  | 16.61     | 58.30    | -        | 291.78 | 26.46     | 103.50   | -        | 291.28 | m. terme - B1  | 17.40  | 267.36   | -        | 294.86 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| m. terme - A1B   | 16.37     | 54.42    | -        | 291.59 | 25.62     | 95.37    | -        | 291.21 | m. terme - A1B | 17.14  | 232.51   | -        | 294.52 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| m. terme - A2  | 16.12     | 50.55    | -        | 291.41 | 24.79     | 87.23    | -        | 291.14 | m. terme - A2  | 16.88  | 197.67   | -        | 294.19 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| l. terme - B1  | 16.08     | 54.76    | -        | 291.76 | 25.60     | 104.45   | -        | 291.22 | l. terme - B1  | 16.86  | 253.40   | -        | 294.87 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| l. terme - A1B   | 14.72     | 46.88    | -        | 291.53 | 23.42     | 88.16    | -        | 291.08 | l. terme - A1B | 15.46  | 194.54   | -        | 294.25 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| l. terme - A2  | 13.35     | 38.99    | -        | 291.30 | 21.24     | 71.87    | -        | 290.93 | l. terme - A2  | 14.07  | 135.68   | -        | 293.63 | -         | -        | -        | -      |  |  |
| T6   |           |          |          |        |           |          |          |        |                |  |          |          |        |           |          |          |        |  |  |
| 99100  |           |          |          |        | 99300     |          |          |        |                | 99100  |          |          |        |           | 99300    |          |        |  |  |
| Scénario   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Scénario       | Orniérage  | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |  |  |
| réf.1  | 9.08      | 20.97    | -        | 175.23 | 14.80     | 34.01    | -        | 174.89 | réf.1          | 9.17   | 48.27    | -        | 176.74 | 15.54     | 81.56    | -        | 176.81 |  |  |
| c. terme - B1  | 7.25      | 17.47    | -        | 175.18 | 13.17     | 30.24    | -        | 174.87 | c. terme - B1  | 8.08   | 37.80    | -        | 176.61 | 13.94     | 70.34    | -        | 176.59 |  |  |
| c. terme - A1B   | 7.21      | 17.35    | -        | 175.19 | 13.20     | 29.73    | -        | 174.87 | c. terme - A1B | 8.08   | 37.18    | -        | 176.56 | 13.95     | 67.78    | -        | 176.55 |  |  |
| c. terme - A2  | 7.17      | 17.22    | -        | 175.20 | 13.22     | 29.22    | -        | 174.87 | c. terme - A2  | 8.08   | 36.56    | -        | 176.50 | 13.97     | 65.23    | -        | 176.51 |  |  |
| m. terme - B1  | 6.33      | 15.96    | -        | 175.15 | 12.07     | 27.22    | -        | 174.85 | m. terme - B1  | 7.17   | 35.16    | -        | 176.51 | 12.82     | 62.16    | -        | 176.59 |  |  |
| m. terme - A1B   | 6.29      | 15.51    | -        | 175.14 | 11.86     | 26.01    | -        | 174.86 | m. terme - A1B | 7.13   | 33.19    | -        | 176.39 | 12.56     | 57.63    | -        | 176.40 |  |  |
| m. terme - A2  | 6.25      | 15.06    | -        | 175.14 | 11.65     | 24.80    | -        | 174.88 | m. terme - A2  | 7.08   | 31.22    | -        | 176.27 | 12.29     | 53.09    | -        | 176.20 |  |  |
| l. terme - B1  | 6.25      | 15.17    | -        | 175.16 | 11.29     | 26.04    | -        | 174.83 | l. terme - B1  | 7.08   | 33.05    | -        | 176.52 | 11.99     | 60.65    | -        | 176.54 |  |  |
| l. terme - A1B   | 5.71      | 13.54    | -        | 175.01 | 10.23     | 22.98    | -        | 174.77 | l. terme - A1B | 6.21   | 28.52    | -        | 176.18 | 11.03     | 51.72    | -        | 176.35 |  |  |
| l. terme - A2  | 5.17      | 11.91    | -        | 174.86 | 9.17      | 19.92    | -        | 174.71 | l. terme - A2  | 5.33   | 23.99    | -        | 175.85 | 10.08     | 42.80    | -        | 176.15 |  |  |

10.5.2.2. Analyse de risque

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 2  |  |  |  |  |  |  |
| Analyse de risque - Catégorie de risque                                    |  |  |  |  |  |  |
| Région "intermédiaire"   |  |  |  |  |  |  |

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 29.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 27.4 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| long-terme  | 0.0%            | 25.4 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 21.0 ans    | 33.3%         | 21.1 ans    | 33.3%         | 19.3 ans    |
|             | Très probable | Faible      | Probable      | Faible      | Probable      | Moyenne     |
|             | Moyenne       |             | Faible        |             | Moyenne       |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 19.2 ans    | 66.7%         | 19.3 ans    | 66.7%         | 17.6 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 66.7%         | 17.4 ans    | 66.7%         | 17.5 ans    | 88.9%         | 15.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 2**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "chaude"**

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 19.5 ans    | 33.3%         | 20.9 ans    | 66.7%         | 19.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Faible        |             | Elevée        |             |
| moyen-terme | 77.8%         | 18.2 ans    | 33.3%         | 19.6 ans    | 66.7%         | 18.5 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Moyenne       |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 88.9%         | 16.6 ans    | 77.8%         | 17.8 ans    | 88.9%         | 16.8 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 12.9 ans    | 100.0%        | 13.0 ans    | 100.0%        | 12.0 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 12.0 ans    | 100.0%        | 11.9 ans    | 100.0%        | 10.8 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 10.8 ans    | 100.0%        | 10.8 ans    | 100.0%        | 9.8 ans     |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Très grave  |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

**10.5.3. Mesure 3 : Adaptation des épaisseurs des couches de grave**

*10.5.3.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 3 – a*

|  |  |
|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 3 - a<br>Durée de vie [an]<br>Sol S2 - Superstructure SS1 | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 3 - a<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure SS1 |
|--|--|

| Scénario       | T5       |          |          | T5       |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                | 99100    |          |          | 99300    |          |          |
| Performances   | Omiérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omiérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.92    | 108.72   | 342.68   | 22.04    | 218.08   | 704.09   |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.29    | 61.15    | 182.49   | 16.17    | 103.31   | 377.27   |

| Scénario       | T6       |          |          | T6       |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                | 99100    |          |          | 99300    |          |          |
| Performances   | Omiérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omiérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 8.17     | 523.24   | 1002.12  | 13.56    | -        | 3176.61  |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A2  | 5.25     | 209.82   | 395.14   | 9.17     | 594.50   | 1136.71  |

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| Modèle DARWin-ME   | Modèle DARWin-ME   |
| Mesure d'adaptation 3 - a  | Mesure d'adaptation 3 - a  |
| Durée de vie [an]  | Durée de vie [an]  |
| Sol S4 - Superstructure SS1  | Sol S2 - Superstructure SS2  |

| Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.67     | 32.08    | 426.17   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.63     | 20.32    | 213.85   | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.26     | 109.70   | 1540.70  | 23.69     | 259.87   | 13608.27 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.08     | 46.93    | 488.19   | 16.11     | 97.20    | 1702.21  |

|  |
|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| Modèle DARWin-ME   |
| Mesure d'adaptation 3 - a  |
| Durée de vie [an]  |
| Sol S3 - Superstructure SS2  |

| Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 22.13     | 54.38    | 120.54   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 15.12     | 31.31    | 75.09    | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 17.86     | 337.69   | 482.26   | 26.85     | 903.07   | 1928.09  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.95     | 107.44   | 205.93   | 18.75     | 299.20   | 552.60   |



10.5.3.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 3 – b

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| Modèle DARWin-ME   | Modèle DARWin-ME   |
| Mesure d'adaptation 3 - b  | Mesure d'adaptation 3 - b  |
| Durée de vie [an]  | Durée de vie [an]  |
| Sol S2 - Superstructure SS1  | Sol S3 - Superstructure SS1  |

| Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.18     | 100.51   | 357.14   | 22.38     | 200.83   | 779.44   |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.42     | 57.70    | 189.58   | 16.38     | 100.58   | 393.34   |

| Scénario       | T6        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 8.17      | 555.35   | 1087.72  | 13.57     | -        | 4227.65  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 5.25      | 192.28   | 401.50   | 9.17      | 732.29   | 1183.03  |

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| Modèle DARWin-ME   | Modèle DARWin-ME   |
| Mesure d'adaptation 3 - b  | Mesure d'adaptation 3 - b  |
| Durée de vie [an]  | Durée de vie [an]  |
| Sol S4 - Superstructure SS1  | Sol S2 - Superstructure SS2  |

| Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 26.08     | 33.68    | 449.41   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.93     | 21.46    | 220.10   | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
| Performances   | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.19     | 108.32   | 1663.74  | 23.63     | 266.66   | 11957.72 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.08     | 47.31    | 512.27   | 16.04     | 96.87    | 1956.55  |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 3 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 22.06     | 55.66    | 125.86   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 14.93     | 33.07    | 78.04    | -         | -        | -        |

| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 17.82     | 347.87   | 525.05   | 26.80     | -        | 2024.95  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.93     | 106.80   | 218.23   | 18.74     | 265.86   | 658.66   |

**10.5.4. Mesure 4 : Adaptation des épaisseurs des couches stabilisées**

**10.5.4.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 4 – a**

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 4 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SSS**

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 4 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| réf.1          | 16.83     | 80.66    | -        | 296.93 | 25.66     | 143.24   | -        | 296.30 |
| c. terme - B1  | 14.32     | 61.15    | -        | 297.09 | 23.27     | 120.81   | -        | 296.24 |
| c. terme - A1B | 14.29     | 60.04    | -        | 297.04 | 23.08     | 114.70   | -        | 296.22 |
| c. terme - A2  | 14.25     | 58.94    | -        | 296.99 | 22.89     | 108.59   | -        | 296.19 |
| m. terme - B1  | 13.11     | 58.45    | -        | 297.04 | 21.52     | 103.87   | -        | 296.27 |
| m. terme - A1B | 13.02     | 54.63    | -        | 296.96 | 20.95     | 95.67    | -        | 296.31 |
| m. terme - A2  | 12.93     | 50.81    | -        | 296.98 | 20.38     | 87.47    | -        | 296.34 |
| l. terme - B1  | 12.71     | 54.93    | -        | 297.03 | 20.76     | 104.71   | -        | 296.23 |
| l. terme - A1B | 11.65     | 47.06    | -        | 296.93 | 19.02     | 88.57    | -        | 296.29 |
| l. terme - A2  | 10.58     | 39.18    | -        | 296.84 | 17.28     | 72.42    | -        | 296.35 |

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |     |
| réf.1          | 19.22     | 330.55   | -        | 301.29 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 16.42     | 219.48   | -        | 301.15 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 16.37     | 208.81   | -        | 301.00 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 16.32     | 198.14   | -        | 300.84 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 15.23     | 216.27   | -        | 300.91 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 15.05     | 190.13   | -        | 300.61 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 14.88     | 169.99   | -        | 300.30 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 14.75     | 204.09   | -        | 300.88 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 13.54     | 159.59   | -        | 300.39 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 12.34     | 115.10   | -        | 299.89 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| réf.1          | 7.00      | 21.25    | -        | 177.98 | 11.54     | 34.80    | -        | 177.54 |
| c. terme - B1  | 6.00      | 17.67    | -        | 178.06 | 10.11     | 30.77    | -        | 177.56 |
| c. terme - A1B | 5.67      | 17.54    | -        | 178.01 | 10.20     | 30.24    | -        | 177.53 |
| c. terme - A2  | 5.33      | 17.42    | -        | 177.96 | 10.29     | 29.71    | -        | 177.50 |
| m. terme - B1  | 5.08      | 16.13    | -        | 178.07 | 9.25      | 27.64    | -        | 177.57 |
| m. terme - A1B | 5.08      | 15.66    | -        | 178.01 | 9.21      | 26.40    | -        | 177.56 |
| m. terme - A2  | 5.08      | 15.20    | -        | 177.96 | 9.17      | 25.16    | -        | 177.54 |
| l. terme - B1  | 5.08      | 15.32    | -        | 178.06 | 9.00      | 26.48    | -        | 177.58 |
| l. terme - A1B | 4.58      | 13.66    | -        | 178.02 | 8.09      | 23.36    | -        | 177.55 |
| l. terme - A2  | 4.08      | 12.01    | -        | 177.97 | 7.17      | 20.24    | -        | 177.53 |

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| réf.1          | 8.17      | 43.23    | -        | 179.11 | 13.66     | 72.47    | -        | 179.03 |
| c. terme - B1  | 7.08      | 34.09    | -        | 179.10 | 12.17     | 63.43    | -        | 178.83 |
| c. terme - A1B | 7.04      | 33.58    | -        | 179.11 | 12.22     | 61.15    | -        | 178.88 |
| c. terme - A2  | 7.00      | 33.08    | -        | 179.11 | 12.27     | 58.86    | -        | 178.92 |
| m. terme - B1  | 6.17      | 31.67    | -        | 179.09 | 11.16     | 55.68    | -        | 178.91 |
| m. terme - A1B | 6.17      | 30.04    | -        | 178.94 | 10.98     | 51.90    | -        | 178.78 |
| m. terme - A2  | 6.17      | 28.41    | -        | 178.78 | 10.81     | 48.11    | -        | 178.65 |
| l. terme - B1  | 6.08      | 29.82    | -        | 179.13 | 10.39     | 54.27    | -        | 178.93 |
| l. terme - A1B | 5.58      | 25.89    | -        | 178.88 | 9.36      | 46.54    | -        | 178.77 |
| l. terme - A2  | 5.08      | 21.97    | -        | 178.63 | 8.33      | 38.81    | -        | 178.61 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 4 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |     |
| réf.1          | 21.17     | -        | -        | 297.19 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 18.09     | 468.26   | -        | 296.76 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 18.02     | 426.68   | -        | 296.65 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 17.95     | 385.11   | -        | 296.55 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 16.88     | 419.08   | -        | 296.63 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 16.65     | 361.58   | -        | 296.24 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 16.41     | 304.08   | -        | 295.86 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 16.36     | 347.58   | -        | 296.54 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 15.03     | 275.64   | -        | 295.85 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 13.69     | 203.71   | -        | 295.16 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| réf.1          | 9.08      | 109.31   | -        | 178.57 | 14.76     | 189.27   | -        | 178.77 |
| c. terme - B1  | 7.33      | 78.73    | -        | 178.52 | 13.26     | 163.36   | -        | 178.54 |
| c. terme - A1B | 7.29      | 76.81    | -        | 178.39 | 13.27     | 153.73   | -        | 178.53 |
| c. terme - A2  | 7.25      | 74.89    | -        | 178.26 | 13.28     | 144.09   | -        | 178.52 |
| m. terme - B1  | 7.00      | 74.83    | -        | 178.27 | 12.19     | 140.89   | -        | 178.57 |
| m. terme - A1B | 6.71      | 68.30    | -        | 178.15 | 11.96     | 126.00   | -        | 178.41 |
| m. terme - A2  | 6.42      | 61.77    | -        | 178.02 | 11.73     | 111.10   | -        | 178.25 |
| l. terme - B1  | 6.33      | 69.80    | -        | 178.34 | 11.36     | 139.94   | -        | 178.47 |
| l. terme - A1B | 5.79      | 57.56    | -        | 178.01 | 10.31     | 114.60   | -        | 178.21 |
| l. terme - A2  | 5.25      | 45.32    | -        | 177.68 | 9.25      | 89.26    | -        | 177.94 |

10.5.4.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 4 – b

|  |  |
|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 4 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S2 - Superstructure S55 | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 4 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure S55 |
|--|--|

| Scénario       | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 17.33     | 64.53    | -        | 294.20 | 26.43     | 112.98   | -        | 293.51 |
| c. terme - B1  | 14.73     | 49.91    | -        | 294.39 | 23.92     | 96.22    | -        | 293.62 |
| c. terme - A1B | 14.88     | 49.15    | -        | 294.36 | 23.72     | 91.98    | -        | 293.55 |
| c. terme - A2  | 14.64     | 48.38    | -        | 294.33 | 23.51     | 87.73    | -        | 293.48 |
| m. terme - B1  | 13.51     | 47.34    | -        | 294.28 | 22.12     | 83.86    | -        | 293.64 |
| m. terme - A1B | 13.40     | 44.66    | -        | 294.27 | 21.53     | 77.64    | -        | 293.57 |
| m. terme - A2  | 13.30     | 41.98    | -        | 294.25 | 20.95     | 71.42    | -        | 293.50 |
| l. terme - B1  | 13.10     | 44.67    | -        | 294.31 | 21.35     | 83.30    | -        | 293.63 |
| l. terme - A1B | 12.00     | 38.70    | -        | 294.26 | 19.56     | 71.15    | -        | 293.60 |
| l. terme - A2  | 10.89     | 32.74    | -        | 294.20 | 17.77     | 59.00    | -        | 293.57 |

| Scénario       | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| réf.1          | 19.64     | 207.72   | -        | 298.90 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 16.75     | 140.57   | -        | 298.71 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 16.70     | 136.81   | -        | 298.63 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 16.64     | 133.05   | -        | 298.54 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 15.54     | 139.11   | -        | 298.61 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 15.36     | 124.86   | -        | 298.35 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 15.17     | 110.62   | -        | 298.08 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 15.06     | 130.10   | -        | 298.63 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 13.81     | 105.27   | -        | 298.16 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 12.57     | 80.43    | -        | 297.69 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 7.08      | 17.70    | -        | 176.46 | 11.97     | 38.76    | -        | 176.19 |
| c. terme - B1  | 6.08      | 14.86    | -        | 176.57 | 10.49     | 25.60    | -        | 176.21 |
| c. terme - A1B | 6.04      | 14.78    | -        | 176.59 | 10.57     | 25.25    | -        | 176.14 |
| c. terme - A2  | 6.00      | 14.70    | -        | 176.61 | 10.65     | 24.91    | -        | 176.08 |
| m. terme - B1  | 5.17      | 13.48    | -        | 176.49 | 9.92      | 23.09    | -        | 176.23 |
| m. terme - A1B | 5.17      | 13.16    | -        | 176.55 | 9.59      | 22.18    | -        | 176.25 |
| m. terme - A2  | 5.17      | 12.84    | -        | 176.61 | 9.25      | 21.27    | -        | 176.26 |
| l. terme - B1  | 5.17      | 12.83    | -        | 176.60 | 9.08      | 22.04    | -        | 176.19 |
| l. terme - A1B | 4.67      | 11.48    | -        | 176.57 | 8.17      | 19.56    | -        | 176.21 |
| l. terme - A2  | 4.17      | 10.13    | -        | 176.53 | 7.25      | 17.09    | -        | 176.24 |

| Scénario       | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 8.17      | 32.34    | -        | 177.87 | 14.04     | 53.60    | -        | 177.59 |
| c. terme - B1  | 7.17      | 26.13    | -        | 177.86 | 12.48     | 47.21    | -        | 177.52 |
| c. terme - A1B | 7.13      | 25.81    | -        | 177.79 | 12.52     | 45.84    | -        | 177.51 |
| c. terme - A2  | 7.08      | 25.49    | -        | 177.72 | 12.57     | 44.48    | -        | 177.50 |
| m. terme - B1  | 6.17      | 24.07    | -        | 177.86 | 11.46     | 41.83    | -        | 177.55 |
| m. terme - A1B | 6.17      | 23.07    | -        | 177.71 | 11.28     | 39.41    | -        | 177.46 |
| m. terme - A2  | 6.17      | 22.08    | -        | 177.56 | 11.09     | 36.99    | -        | 177.37 |
| l. terme - B1  | 6.17      | 22.77    | -        | 177.71 | 10.67     | 40.48    | -        | 177.55 |
| l. terme - A1B | 5.63      | 20.03    | -        | 177.57 | 9.88      | 35.13    | -        | 177.39 |
| l. terme - A2  | 5.08      | 17.28    | -        | 177.43 | 9.08      | 29.79    | -        | 177.23 |

|  |
|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 4 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure S55 |
|--|

| Scénario       | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| réf.1          | 21.84     | 412.16   | -        | 295.33 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 18.62     | 265.37   | -        | 295.10 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 18.55     | 253.26   | -        | 294.95 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 18.48     | 241.15   | -        | 294.80 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 17.40     | 267.36   | -        | 294.86 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 17.14     | 232.51   | -        | 294.52 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 16.88     | 197.67   | -        | 294.19 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 16.86     | 253.40   | -        | 294.87 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 15.46     | 194.54   | -        | 294.25 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 14.07     | 135.68   | -        | 293.63 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 9.17      | 71.00    | -        | 177.58 | 15.25     | 121.50   | -        | 177.84 |
| c. terme - B1  | 8.08      | 53.66    | -        | 177.58 | 13.69     | 104.03   | -        | 177.54 |
| c. terme - A1B | 8.04      | 52.50    | -        | 177.49 | 13.69     | 99.01    | -        | 177.54 |
| c. terme - A2  | 8.00      | 51.34    | -        | 177.39 | 13.70     | 93.99    | -        | 177.54 |
| m. terme - B1  | 7.08      | 50.32    | -        | 177.40 | 12.61     | 90.79    | -        | 177.62 |
| m. terme - A1B | 7.08      | 46.76    | -        | 177.26 | 12.35     | 82.30    | -        | 177.39 |
| m. terme - A2  | 7.08      | 43.21    | -        | 177.11 | 12.08     | 75.01    | -        | 177.17 |
| l. terme - B1  | 7.08      | 47.03    | -        | 177.39 | 11.76     | 89.38    | -        | 177.42 |
| l. terme - A1B | 6.21      | 39.80    | -        | 177.08 | 10.84     | 74.93    | -        | 177.16 |
| l. terme - A2  | 5.33      | 32.57    | -        | 176.77 | 9.92      | 60.48    | -        | 176.91 |

10.5.4.3. Analyse de risque : Mesure 4 – a

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 4 - a**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "intermédiaire"**

| Trafic T5   |               |             |             |             |             |             |
|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 11.1%         | 21.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Improbable    | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible   |             |             |             |             |             |
| moyen-terme | 33.3%         | 20.2 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable      | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Faible        |             |             |             |             |             |
| long-terme  | 77.8%         | 18.5 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très probable | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|             | Elevée        |             |             |             |             |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 14.9 ans    | 66.7%         | 18.1 ans    | 33.3%         | 19.4 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 13.5 ans    | 66.7%         | 16.4 ans    | 66.7%         | 17.8 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 88.9%         | 12.2 ans    | 88.9%         | 14.8 ans    | 88.9%         | 16.0 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 4 - a**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "chaude"**

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.0 ans    | 100.0%        | 17.9 ans    | 66.7%         | 20.0 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 12.9 ans    | 100.0%        | 16.6 ans    | 66.7%         | 18.6 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 100.0%        | 11.6 ans    | 100.0%        | 15.1 ans    | 88.9%         | 16.9 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 9.1 ans     | 100.0%        | 11.1 ans    | 100.0%        | 12.0 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 8.2 ans     | 100.0%        | 10.2 ans    | 100.0%        | 11.0 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 7.4 ans     | 100.0%        | 9.1 ans     | 100.0%        | 9.8 ans     |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

10.5.4.4. Analyse de risque : Mesure 4 – b

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 4 - b*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "intermédiaire"*

| Trafic T5   |               |             |             |             |             |             |
|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 11.1%         | 22.1 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Improbable    | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible   |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme | 33.3%         | 20.4 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable      | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Faible        |             | -           |             | -           |             |
| long-terme  | 77.8%         | 18.7 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très probable | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|             | Elevée        |             | -           |             | -           |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 15.0 ans    | 66.7%         | 18.2 ans    | 33.3%         | 19.5 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 13.7 ans    | 66.7%         | 16.5 ans    | 66.7%         | 17.9 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 88.9%         | 12.2 ans    | 88.9%         | 14.9 ans    | 88.9%         | 16.2 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 4 - b*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "chaude"*

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.2 ans    | 100.0%        | 18.1 ans    | 66.7%         | 20.2 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 13.1 ans    | 100.0%        | 16.7 ans    | 66.7%         | 18.8 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 100.0%        | 11.7 ans    | 100.0%        | 15.1 ans    | 88.9%         | 17.0 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 9.2 ans     | 100.0%        | 11.1 ans    | 100.0%        | 12.2 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 8.2 ans     | 100.0%        | 10.2 ans    | 100.0%        | 11.1 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 7.4 ans     | 100.0%        | 9.1 ans     | 100.0%        | 9.9 ans     |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

### 10.5.5. Mesure 5 : Adaptation des épaisseurs des couches de fondation en enrobé bitumineux AC F

#### 10.5.5.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 5 – a

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| <i>Modèle DARWin-ME</i>  |  |  |  |  |  |  |
| <i>Mesure d'adaptation 5 - a</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Durée de vie [an]</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Sol S2 - Superstructure SS2</i>   |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 20.11     | -        | 291.86   | 28.48     | -        | 581.37   |
| c. terme - B1  | 17.62     | -        | 214.05   | 26.46     | -        | 505.46   |
| c. terme - A1B | 17.58     | -        | 216.22   | 26.28     | -        | 453.15   |
| c. terme - A2  | 17.54     | -        | 218.39   | 26.09     | -        | 400.85   |
| m. terme - B1  | 16.63     | 801.21   | 232.80   | 24.99     | -        | 382.02   |
| m. terme - A1B | 16.48     | 632.34   | 219.38   | 24.50     | -        | 360.31   |
| m. terme - A2  | 16.34     | 463.47   | 205.97   | 24.00     | -        | 338.60   |
| l. terme - B1  | 16.21     | 745.89   | 217.90   | 24.41     | -        | 452.66   |
| l. terme - A1B | 15.13     | 510.70   | 191.84   | 22.87     | -        | 391.16   |
| l. terme - A2  | 14.05     | 275.51   | 165.78   | 21.34     | -        | 329.66   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| <i>Modèle DARWin-ME</i>  |  |  |  |  |  |  |
| <i>Mesure d'adaptation 5 - a</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Durée de vie [an]</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Sol S3 - Superstructure SS2</i>   |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 24.93     | 110.53   | 204.39   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 21.74     | 81.14    | 152.30   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 21.67     | 80.10    | 154.91   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 21.59     | 79.06    | 157.52   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 20.67     | 80.08    | 162.84   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 20.36     | 73.91    | 153.22   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 20.05     | 67.73    | 143.60   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 20.12     | 75.58    | 154.44   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 18.63     | 64.09    | 136.36   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.14     | 52.61    | 118.28   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.90     | -        | 2474.22  | 31.34     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 19.04     | -        | 726.22   | 28.83     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 18.93     | -        | 997.44   | 28.50     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 18.81     | -        | 1268.66  | 28.18     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 17.89     | -        | 1744.01  | 27.06     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 17.75     | -        | 1364.26  | 26.42     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 17.61     | -        | 984.51   | 25.79     | -        | 640.17   |
| l. terme - B1  | 17.65     | -        | 1703.96  | 26.27     | -        | 13582.49 |
| l. terme - A1B | 16.43     | -        | 1113.63  | 24.54     | -        | 8796.11  |
| l. terme - A2  | 15.21     | -        | 523.31   | 22.82     | -        | 4009.74  |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.71     | -        | 990.26   | 31.92     | -        | 5842.94  |
| c. terme - B1  | 18.79     | 479.11   | 466.82   | 28.97     | -        | 16418.50 |
| c. terme - A1B | 18.72     | 463.05   | 504.90   | 28.66     | -        | 8756.43  |
| c. terme - A2  | 18.65     | 446.99   | 542.98   | 28.36     | -        | 1094.36  |
| m. terme - B1  | 17.71     | 469.64   | 717.50   | 27.09     | -        | 875.54   |
| m. terme - A1B | 17.53     | 442.62   | 604.91   | 26.41     | -        | 779.42   |
| m. terme - A2  | 17.35     | 415.61   | 492.32   | 25.74     | -        | 683.29   |
| l. terme - B1  | 17.24     | 455.77   | 688.38   | 26.39     | -        | 3311.85  |
| l. terme - A1B | 16.04     | 335.29   | 505.89   | 24.51     | -        | 2255.03  |
| l. terme - A2  | 14.83     | 214.80   | 323.41   | 22.62     | -        | 1198.20  |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| <i>Modèle DARWin-ME</i>  |  |  |  |  |  |  |
| <i>Mesure d'adaptation 5 - a</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Durée de vie [an]</i>   |  |  |  |  |  |  |
| <i>Sol S4 - Superstructure SS2</i>   |  |  |  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.12     | 83.86    | 83.11    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 22.02     | 56.75    | 61.89    | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 21.96     | 55.55    | 61.51    | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 21.89     | 54.35    | 61.12    | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 20.98     | 53.99    | 60.63    | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 20.63     | 49.43    | 57.63    | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 20.28     | 44.86    | 54.64    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 20.40     | 50.55    | 57.77    | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 18.87     | 41.07    | 50.28    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.35     | 31.58    | 42.79    | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 22.07     | 419.34   | 331.42   | 31.67     | -        | 1522.80  |
| c. terme - B1  | 19.14     | 291.73   | 180.81   | 29.12     | -        | 1985.90  |
| c. terme - A1B | 19.08     | 277.05   | 182.91   | 28.83     | -        | 1207.48  |
| c. terme - A2  | 19.01     | 262.38   | 185.00   | 28.54     | -        | 429.07   |
| m. terme - B1  | 18.04     | 303.01   | 205.33   | 27.31     | 502.33   | 382.45   |
| m. terme - A1B | 17.81     | 273.91   | 182.42   | 26.63     | 431.75   | 335.13   |
| m. terme - A2  | 17.58     | 244.82   | 159.51   | 25.95     | 361.17   | 287.81   |
| l. terme - B1  | 17.55     | 284.27   | 195.08   | 26.62     | 535.63   | 630.27   |
| l. terme - A1B | 16.28     | 231.79   | 152.53   | 24.65     | 437.95   | 474.03   |
| l. terme - A2  | 15.00     | 179.32   | 109.98   | 22.68     | 340.27   | 317.80   |

10.5.5.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 5 – b

|   |   |
|---|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   | <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 5 - b</i>  | <i>Mesure d'adaptation 5 - b</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  | <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S2 - Superstructure SS2</i>  | <i>Sol S3 - Superstructure SS2</i>  |

| Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          | Scénario       | T5        |          |          | T5        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 24.26     | -        | 549.95   | 33.73     | -        | 1197.77  | réf.1          | 28.57     | 250.58   | 383.36   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 21.39     | -        | 363.30   | 31.30     | -        | 1132.64  | c. terme - B1  | 25.00     | 167.80   | 265.38   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 21.32     | -        | 373.72   | 31.02     | -        | 933.51   | c. terme - A1B | 24.90     | 166.53   | 270.71   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 21.26     | -        | 384.14   | 30.75     | -        | 734.39   | c. terme - A2  | 24.81     | 165.26   | 276.04   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 20.41     | -        | 433.33   | 29.60     | -        | 691.51   | m. terme - B1  | 23.89     | 178.04   | 299.07   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 20.15     | -        | 397.42   | 29.00     | -        | 642.19   | m. terme - A1B | 23.47     | 156.19   | 276.55   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 19.89     | -        | 361.50   | 28.40     | -        | 592.86   | m. terme - A2  | 23.05     | 134.34   | 254.04   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 19.88     | -        | 402.39   | 29.05     | -        | 916.57   | l. terme - B1  | 23.27     | 167.25   | 280.41   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 18.56     | -        | 340.19   | 27.26     | -        | 773.18   | l. terme - A1B | 21.56     | 132.26   | 240.86   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.24     | -        | 278.00   | 25.48     | -        | 629.79   | l. terme - A2  | 19.84     | 97.27    | 201.31   | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 28.00     | -        | 5495.69  | 38.92     | -        | -        | réf.1          | 27.39     | -        | 2727.95  | 39.22     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 24.47     | -        | 954.41   | 36.03     | -        | -        | c. terme - B1  | 23.86     | -        | 875.02   | 35.70     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 24.35     | -        | 2984.61  | 35.52     | -        | -        | c. terme - A1B | 23.76     | -        | 1198.62  | 35.26     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 24.23     | -        | 5014.81  | 35.02     | -        | -        | c. terme - A2  | 23.65     | -        | 1522.23  | 34.82     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 23.33     | -        | 7265.84  | 33.90     | -        | -        | m. terme - B1  | 22.79     | -        | 2137.38  | 33.46     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 23.04     | -        | 4495.96  | 33.01     | -        | -        | m. terme - A1B | 22.44     | -        | 1584.26  | 32.59     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 22.74     | -        | 1726.08  | 32.13     | -        | -        | m. terme - A2  | 22.08     | -        | 1031.14  | 31.72     | -        | 256.69   |
| l. terme - B1  | 22.77     | -        | 6993.00  | 33.10     | -        | -        | l. terme - B1  | 22.17     | -        | 2251.30  | 32.81     | -        | 3741.32  |
| l. terme - A1B | 21.33     | -        | 3991.07  | 31.01     | -        | -        | l. terme - A1B | 20.64     | -        | 1445.80  | 30.52     | -        | 5145.59  |
| l. terme - A2  | 19.88     | -        | 989.14   | 28.91     | -        | -        | l. terme - A2  | 19.10     | -        | 640.31   | 28.24     | -        | 6549.86  |

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 5 - b</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S4 - Superstructure SS2</i>  |

| Scénario       | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 28.83     | 213.75   | 146.21   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 25.33     | 125.59   | 103.00   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 25.23     | 122.85   | 102.92   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 25.13     | 120.10   | 102.84   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 24.27     | 129.43   | 105.47   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 23.82     | 112.25   | 98.79    | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 23.36     | 95.07    | 92.11    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 23.59     | 121.42   | 100.29   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 21.83     | 91.73    | 84.73    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 20.07     | 62.04    | 69.18    | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 27.82     | -        | 842.13   | 38.99     | -        | 6727.86  |
| c. terme - B1  | 24.26     | -        | 328.11   | 36.09     | -        | 20672.84 |
| c. terme - A1B | 24.16     | -        | 342.42   | 35.62     | -        | 10624.66 |
| c. terme - A2  | 24.06     | -        | 356.73   | 35.15     | -        | 576.47   |
| m. terme - B1  | 23.17     | 628.28   | 439.05   | 33.72     | -        | 756.79   |
| m. terme - A1B | 22.76     | 542.31   | 369.22   | 32.84     | -        | 580.08   |
| m. terme - A2  | 22.35     | 456.34   | 299.40   | 31.96     | -        | 403.38   |
| l. terme - B1  | 22.50     | 568.11   | 429.00   | 33.10     | -        | 2290.99  |
| l. terme - A1B | 20.90     | 434.20   | 309.09   | 30.70     | -        | 1498.70  |
| l. terme - A2  | 19.30     | 300.29   | 189.18   | 28.31     | -        | 706.41   |

## 10.5.5.3. Analyse de risque : Mesure 5 – a

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>   |
| <b>Mesure d'adaptation 5 - a</b>  |
| <b>Analyse de risque - Catégorie de risque</b>                                    |
| <b>Région "intermédiaire"</b>   |

| Trafic T5   |             |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2      |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 11.1%       | 22.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Improbable  | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible |             |             |             |             |             |
| moyen-terme | 55.6%       | 21.1 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable    | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Faible      |             |             |             |             |             |
| long-terme  | 55.6%       | 19.4 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable    | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|             | Moyenne     |             |             |             |             |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 16.9 ans    | 66.7%         | 19.5 ans    | 33.3%         | 20.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Faible        |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 15.3 ans    | 66.7%         | 17.8 ans    | 66.7%         | 19.1 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 66.7%         | 13.9 ans    | 66.7%         | 16.1 ans    | 66.7%         | 17.4 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>   |
| <b>Mesure d'adaptation 5 - a</b>  |
| <b>Analyse de risque - Catégorie de risque</b>                                    |
| <b>Région "chaude"</b>  |

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.8 ans    | 66.7%         | 18.8 ans    | 33.3%         | 20.8 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Faible        |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 13.7 ans    | 66.7%         | 17.5 ans    | 33.3%         | 19.4 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| long-terme  | 100.0%        | 12.3 ans    | 88.9%         | 15.9 ans    | 77.8%         | 17.6 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 10.5 ans    | 100.0%        | 12.1 ans    | 100.0%        | 13.1 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 9.7 ans     | 100.0%        | 11.2 ans    | 100.0%        | 12.0 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 8.8 ans     | 100.0%        | 10.1 ans    | 100.0%        | 10.9 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |



10.5.5.4. Analyse de risque : Mesure 5 – b

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 5 - b*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "intermédiaire"*

| <i>Trafic T5</i> |             |             |             |             |             |             |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2      |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|                  | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme      | 11.1%       | 24.5 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Improbable  | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|                  | Très faible |             |             |             |             |             |
| moyen-terme      | 55.6%       | 22.6 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Probable    | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|                  | Faible      |             |             |             |             |             |
| long-terme       | 55.6%       | 20.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Probable    | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|                  | Faible      |             |             |             |             |             |

| <i>Trafic T6</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 66.7%         | 19.2 ans    | 66.7%         | 21.7 ans    | 33.3%         | 23.2 ans    |
|                  | Très probable | Moyenne     | Très probable | Faible      | Probable      | Faible      |
|                  | Elevée        |             | Moyenne       |             | Faible        |             |
| moyen-terme      | 66.7%         | 17.5 ans    | 66.7%         | 19.8 ans    | 66.7%         | 21.2 ans    |
|                  | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Faible      |
|                  | Elevée        |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| long-terme       | 66.7%         | 16.1 ans    | 66.7%         | 18.1 ans    | 66.7%         | 19.4 ans    |
|                  | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|                  | Elevée        |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 5 - b*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "chaude"*

| <i>Trafic T5</i> |               |             |               |             |             |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4      |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme      | 66.7%         | 16.1 ans    | 66.7%         | 19.9 ans    | 33.3%       | 21.9 ans    |
|                  | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Probable    | Faible      |
|                  | Elevée        |             | Elevée        |             | Faible      |             |
| moyen-terme      | 77.8%         | 14.9 ans    | 66.7%         | 18.5 ans    | 33.3%       | 20.4 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable    | Faible      |
|                  | Très élevée   |             | Elevée        |             | Faible      |             |
| long-terme       | 100.0%        | 13.5 ans    | 77.8%         | 16.8 ans    | 55.6%       | 18.6 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable    | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne     |             |

| <i>Trafic T6</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 66.7%         | 12.3 ans    | 66.7%         | 13.8 ans    | 66.7%         | 14.8 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme      | 66.7%         | 11.4 ans    | 66.7%         | 12.9 ans    | 66.7%         | 13.6 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme       | 77.8%         | 10.4 ans    | 77.8%         | 11.6 ans    | 77.8%         | 12.4 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

10.5.6. Mesure 6 : Adaptation des épaisseurs des couches bitumineuses

10.5.6.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 6 – a

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>  | <b>Modèle DARWin-ME</b>  |
| <i>Mesure d'adaptation 6 - a</i>   | <i>Mesure d'adaptation 6 - a</i>   |
| <i>Durée de vie [an]</i>   | <i>Durée de vie [an]</i>   |
| <b>Sol S2 - Superstructure SS1</b>   | <b>Sol S3 - Superstructure SS1</b>   |

| T5             |           |          |          |           |          |          | T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          | Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 17.16     | 310.90   | 693.75   | 25.03     | -        | 1471.88  | réf.1          | 23.92     | 102.48   | 718.05   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 14.93     | 208.84   | 457.34   | 22.98     | 525.88   | 1325.86  | c. terme - B1  | 20.84     | 74.44    | 482.36   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 14.85     | 206.89   | 476.23   | 22.84     | 454.16   | 1112.04  | c. terme - A1B | 20.76     | 73.42    | 485.41   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 14.77     | 204.94   | 495.12   | 22.71     | 382.44   | 898.23   | c. terme - A2  | 20.68     | 72.39    | 488.46   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 13.76     | 232.27   | 557.44   | 21.66     | 312.90   | 843.43   | m. terme - B1  | 19.80     | 74.41    | 578.75   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 13.81     | 207.55   | 497.23   | 21.17     | 283.53   | 787.72   | m. terme - A1B | 19.55     | 69.13    | 516.94   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 13.86     | 182.84   | 437.01   | 20.68     | 254.17   | 732.02   | m. terme - A2  | 19.30     | 63.86    | 455.13   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 13.51     | 198.46   | 506.84   | 21.01     | 434.25   | 1112.47  | l. terme - B1  | 19.30     | 69.49    | 528.31   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 12.66     | 163.67   | 420.75   | 19.60     | 348.92   | 920.85   | l. terme - A1B | 17.97     | 59.67    | 437.19   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.81     | 128.89   | 334.66   | 18.20     | 263.59   | 729.23   | l. terme - A2  | 16.65     | 49.85    | 346.07   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          | T6             |           |          |          |           |          |           |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |           |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut  |
| réf.1          | 10.01     | -        | 2122.11  | 16.45     | -        | 20569.61 | réf.1          | 15.36     | 432.36   | 2388.36  | 23.74     | -        | 89607.60  |
| c. terme - B1  | 9.08      | -        | 896.35   | 14.87     | -        | 58455.96 | c. terme - B1  | 13.11     | 320.34   | 1036.22  | 21.50     | 656.94   | 302882.66 |
| c. terme - A1B | 8.75      | -        | 998.40   | 14.88     | -        | 30055.03 | c. terme - A1B | 13.09     | 327.04   | 1149.01  | 21.34     | 601.99   | 152148.22 |
| c. terme - A2  | 8.42      | -        | 1100.45  | 14.89     | -        | 1654.11  | c. terme - A2  | 13.06     | 333.75   | 1261.80  | 21.18     | 547.04   | 1413.77   |
| m. terme - B1  | 8.08      | -        | 1591.75  | 13.85     | -        | 1375.35  | m. terme - B1  | 12.00     | 379.60   | 1880.23  | 20.01     | 526.50   | 1444.39   |
| m. terme - A1B | 8.08      | -        | 1290.28  | 13.56     | -        | 1419.45  | m. terme - A1B | 12.00     | 346.31   | 1503.18  | 19.54     | 455.17   | 1386.90   |
| m. terme - A2  | 8.08      | -        | 988.81   | 13.28     | -        | 1463.56  | m. terme - A2  | 12.00     | 313.02   | 1126.14  | 19.07     | 383.83   | 1329.41   |
| l. terme - B1  | 8.00      | -        | 1562.77  | 13.14     | -        | 4815.40  | l. terme - B1  | 11.71     | 348.32   | 1839.80  | 19.29     | 544.27   | 8751.87   |
| l. terme - A1B | 7.42      | -        | 1095.51  | 12.04     | -        | 3609.15  | l. terme - A1B | 10.94     | 251.44   | 1254.58  | 17.79     | 450.60   | 5624.73   |
| l. terme - A2  | 6.83      | 688.30   | 628.24   | 10.95     | -        | 2402.91  | l. terme - A2  | 10.17     | 154.55   | 669.36   | 16.28     | 356.92   | 2497.59   |

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>  | <b>Modèle DARWin-ME</b>  |
| <i>Mesure d'adaptation 6 - a</i>   | <i>Mesure d'adaptation 6 - a</i>   |
| <i>Durée de vie [an]</i>   | <i>Durée de vie [an]</i>   |
| <b>Sol S4 - Superstructure SS1</b>   | <b>Sol S2 - Superstructure SS2</b>   |

| T5             |           |          |          |           |          |          | T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          | Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 28.54     | 65.68    | 926.15   | -         | -        | -        | réf.1          | 20.00     | -        | 303.42   | 28.15     | -        | 594.78   |
| c. terme - B1  | 24.83     | 50.76    | 583.22   | -         | -        | -        | c. terme - B1  | 17.54     | -        | 220.37   | 26.24     | -        | 522.45   |
| c. terme - A1B | 24.70     | 50.10    | 595.26   | -         | -        | -        | c. terme - A1B | 17.50     | -        | 222.04   | 26.05     | -        | 466.00   |
| c. terme - A2  | 24.57     | 49.45    | 607.30   | -         | -        | -        | c. terme - A2  | 17.46     | -        | 223.72   | 25.87     | -        | 409.54   |
| m. terme - B1  | 23.73     | 49.07    | 718.61   | -         | -        | -        | m. terme - B1  | 16.56     | 814.84   | 241.54   | 24.79     | -        | 391.12   |
| m. terme - A1B | 23.32     | 46.72    | 638.23   | -         | -        | -        | m. terme - A1B | 16.42     | 627.25   | 230.01   | 24.32     | -        | 368.02   |
| m. terme - A2  | 22.92     | 44.36    | 557.86   | -         | -        | -        | m. terme - A2  | 16.28     | 439.67   | 218.48   | 23.84     | -        | 344.91   |
| l. terme - B1  | 23.09     | 46.36    | 666.59   | -         | -        | -        | l. terme - B1  | 16.11     | 662.31   | 226.16   | 24.23     | -        | 462.85   |
| l. terme - A1B | 21.38     | 41.29    | 539.08   | -         | -        | -        | l. terme - A1B | 15.06     | 476.97   | 199.43   | 22.71     | -        | 400.85   |
| l. terme - A2  | 19.67     | 36.22    | 411.56   | -         | -        | -        | l. terme - A2  | 14.00     | 291.63   | 172.69   | 21.20     | -        | 338.85   |

| T6             |           |          |          |           |          |          | T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 18.20     | 240.28   | 4301.38  | 27.61     | 444.27   | -        | réf.1          | 21.95     | -        | 2376.65  | 31.23     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 15.49     | 154.09   | 1255.70  | 24.99     | 394.81   | -        | c. terme - B1  | 19.14     | -        | 813.02   | 28.84     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 15.44     | 151.73   | 1640.99  | 24.73     | 371.43   | -        | c. terme - A1B | 19.02     | -        | 1088.49  | 28.51     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 15.39     | 149.38   | 2026.29  | 24.46     | 348.06   | 512.30   | c. terme - A2  | 18.90     | -        | 1363.95  | 28.17     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 14.34     | 165.04   | 3324.68  | 23.20     | 365.44   | 584.22   | m. terme - B1  | 17.99     | -        | 1976.80  | 27.08     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 14.25     | 143.59   | 2457.39  | 22.61     | 296.81   | 838.50   | m. terme - A1B | 17.85     | -        | 1500.40  | 26.46     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 14.15     | 122.13   | 1590.11  | 22.03     | 228.18   | 1092.78  | m. terme - A2  | 17.71     | -        | 1024.01  | 25.83     | -        | 635.04   |
| l. terme - B1  | 13.99     | 153.23   | 3215.79  | 22.51     | 386.58   | 15597.22 | l. terme - B1  | 17.76     | -        | 1753.85  | 26.30     | -        | 8817.07  |
| l. terme - A1B | 12.92     | 118.78   | 2030.80  | 20.71     | 291.50   | 10217.60 | l. terme - A1B | 16.54     | -        | 1148.87  | 24.59     | -        | 6199.15  |
| l. terme - A2  | 11.84     | 84.33    | 845.82   | 18.92     | 196.41   | 4837.98  | l. terme - A2  | 15.32     | -        | 543.90   | 22.87     | -        | 3581.23  |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 24.82     | 113.56   | 216.33   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | 21.69     | 82.76    | 160.07   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | 21.63     | 81.88    | 161.42   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | 21.56     | 81.00    | 162.78   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | 20.62     | 81.86    | 169.79   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | 20.30     | 75.61    | 160.82   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | 19.98     | 69.35    | 151.84   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | 20.07     | 76.90    | 159.24   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | 18.60     | 65.26    | 141.80   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 17.12     | 53.62    | 124.36   | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS2**

| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 25.02     | 85.71    | 86.83    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | 21.97     | 58.16    | 64.45    | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | 21.90     | 56.80    | 64.18    | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | 21.84     | 55.44    | 63.92    | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | 20.95     | 55.41    | 63.09    | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | 20.58     | 50.59    | 59.93    | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | 20.21     | 45.77    | 56.77    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | 20.34     | 51.70    | 60.28    | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | 18.83     | 42.01    | 52.44    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 17.31     | 32.31    | 44.60    | -         | -        | -        |

| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 21.80     | -        | 968.07   | 31.83     | -        | 5925.88  |
| c. terme - B1      | 18.89     | 483.16   | 512.45   | 28.97     | -        | 17359.20 |
| c. terme - A1B     | 18.82     | 465.40   | 559.63   | 28.66     | -        | 9245.94  |
| c. terme - A2      | 18.76     | 447.63   | 606.82   | 28.36     | -        | 1132.68  |
| m. terme - B1      | 17.82     | 456.96   | 762.25   | 27.11     | -        | 956.03   |
| m. terme - A1B     | 17.64     | 437.40   | 642.40   | 26.46     | -        | 823.34   |
| m. terme - A2      | 17.45     | 417.85   | 522.54   | 25.80     | -        | 690.66   |
| l. terme - B1      | 17.37     | 472.77   | 716.96   | 26.42     | -        | 3891.98  |
| l. terme - A1B     | 16.16     | 344.26   | 533.42   | 24.56     | -        | 2561.25  |
| l. terme - A2      | 14.95     | 215.75   | 349.88   | 22.69     | -        | 1230.52  |

| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 22.16     | 406.31   | 364.26   | 31.73     | -        | 1355.50  |
| c. terme - B1      | 19.22     | 301.07   | 192.18   | 29.17     | -        | 2056.95  |
| c. terme - A1B     | 19.17     | 287.20   | 193.39   | 28.91     | -        | 1238.57  |
| c. terme - A2      | 19.11     | 273.33   | 194.61   | 28.65     | -        | 420.20   |
| m. terme - B1      | 18.16     | 312.10   | 218.46   | 27.37     | 538.42   | 416.64   |
| m. terme - A1B     | 17.93     | 276.82   | 193.41   | 26.69     | 448.02   | 361.20   |
| m. terme - A2      | 17.69     | 241.54   | 168.37   | 26.00     | 357.63   | 305.75   |
| l. terme - B1      | 17.67     | 300.39   | 206.85   | 26.68     | 555.79   | 692.67   |
| l. terme - A1B     | 16.40     | 240.86   | 161.54   | 24.72     | 449.48   | 515.61   |
| l. terme - A2      | 15.12     | 181.32   | 116.22   | 22.75     | 343.18   | 338.54   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SSS**

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 17.83     | 69.80    | -        | 296.94 | 26.88     | 123.89   | -        | 296.34 |
| c. terme - B1      | 15.23     | 53.14    | -        | 297.11 | 24.32     | 104.72   | -        | 296.25 |
| c. terme - A1B     | 15.18     | 52.22    | -        | 297.06 | 24.12     | 99.80    | -        | 296.21 |
| c. terme - A2      | 15.14     | 51.31    | -        | 297.00 | 23.92     | 94.88    | -        | 296.18 |
| m. terme - B1      | 14.05     | 50.37    | -        | 297.04 | 22.57     | 90.34    | -        | 296.26 |
| m. terme - A1B     | 13.93     | 47.21    | -        | 296.98 | 21.98     | 83.38    | -        | 296.26 |
| m. terme - A2      | 13.80     | 44.05    | -        | 296.93 | 21.40     | 76.41    | -        | 296.27 |
| l. terme - B1      | 13.63     | 47.40    | -        | 297.06 | 21.86     | 90.57    | -        | 296.24 |
| l. terme - A1B     | 12.51     | 40.66    | -        | 296.95 | 20.07     | 76.78    | -        | 296.26 |
| l. terme - A2      | 11.40     | 33.92    | -        | 296.83 | 18.27     | 62.99    | -        | 296.28 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 20.36     | 304.04   | -        | 301.10 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | 17.49     | 188.53   | -        | 300.93 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | 17.44     | 183.97   | -        | 300.76 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | 17.39     | 179.42   | -        | 300.60 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | 16.34     | 190.82   | -        | 300.63 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | 16.12     | 166.96   | -        | 300.40 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | 15.90     | 143.09   | -        | 300.18 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | 15.84     | 174.62   | -        | 300.73 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | 14.57     | 138.11   | -        | 300.17 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 13.30     | 101.61   | -        | 299.61 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 7.92      | 20.73    | -        | 177.04 | 12.88     | 33.83    | -        | 177.49 |
| c. terme - B1      | 6.33      | 17.22    | -        | 178.01 | 11.47     | 30.13    | -        | 177.54 |
| c. terme - A1B     | 6.29      | 17.09    | -        | 177.97 | 11.54     | 29.63    | -        | 177.55 |
| c. terme - A2      | 6.25      | 16.96    | -        | 177.93 | 11.60     | 29.13    | -        | 177.56 |
| m. terme - B1      | 6.00      | 15.67    | -        | 178.03 | 10.50     | 27.04    | -        | 177.54 |
| m. terme - A1B     | 5.92      | 15.23    | -        | 177.97 | 10.35     | 25.84    | -        | 177.51 |
| m. terme - A2      | 5.83      | 14.80    | -        | 177.91 | 10.20     | 24.63    | -        | 177.48 |
| l. terme - B1      | 5.33      | 14.88    | -        | 178.03 | 10.08     | 25.92    | -        | 177.56 |
| l. terme - A1B     | 4.83      | 13.25    | -        | 177.97 | 9.13      | 22.86    | -        | 177.55 |
| l. terme - A2      | 4.33      | 11.62    | -        | 177.92 | 8.17      | 19.80    | -        | 177.55 |

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 9.17      | 42.79    | -        | 178.87 | 15.32     | 71.80    | -        | 178.87 |
| c. terme - B1      | 8.08      | 33.77    | -        | 178.87 | 13.75     | 62.46    | -        | 178.76 |
| c. terme - A1B     | 8.04      | 33.24    | -        | 178.86 | 13.77     | 60.37    | -        | 178.72 |
| c. terme - A2      | 8.00      | 32.70    | -        | 178.85 | 13.80     | 58.27    | -        | 178.68 |
| m. terme - B1      | 7.08      | 31.28    | -        | 178.83 | 12.62     | 55.21    | -        | 178.69 |
| m. terme - A1B     | 7.08      | 29.66    | -        | 178.73 | 12.39     | 51.48    | -        | 178.58 |
| m. terme - A2      | 7.08      | 28.03    | -        | 178.64 | 12.15     | 47.75    | -        | 178.46 |
| l. terme - B1      | 7.08      | 29.44    | -        | 178.88 | 11.82     | 53.78    | -        | 178.69 |
| l. terme - A1B     | 6.21      | 25.51    | -        | 178.64 | 10.95     | 46.11    | -        | 178.57 |
| l. terme - A2      | 5.33      | 21.58    | -        | 178.40 | 10.08     | 38.44    | -        | 178.45 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**

**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 22.39     | 703.98   | -        | 296.94 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | 19.26     | 348.44   | -        | 296.49 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | 19.18     | 344.21   | -        | 296.35 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | 19.11     | 339.98   | -        | 296.21 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | 18.09     | 352.00   | -        | 296.28 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | 17.81     | 307.96   | -        | 295.90 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | 17.53     | 263.93   | -        | 295.53 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | 17.52     | 370.87   | -        | 296.14 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | 16.14     | 280.87   | -        | 295.42 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 14.75     | 190.88   | -        | 294.70 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 10.04     | 110.09   | -        | 178.40 | 16.49     | 192.03   | -        | 178.53 |
| c. terme - B1      | 8.92      | 79.46    | -        | 178.33 | 14.89     | 163.05   | -        | 178.27 |
| c. terme - A1B     | 8.59      | 77.41    | -        | 178.21 | 14.88     | 152.89   | -        | 178.21 |
| c. terme - A2      | 8.25      | 75.35    | -        | 178.09 | 14.87     | 142.74   | -        | 178.15 |
| m. terme - B1      | 8.00      | 75.18    | -        | 178.11 | 13.75     | 141.57   | -        | 178.19 |
| m. terme - A1B     | 7.67      | 68.60    | -        | 177.97 | 13.45     | 126.78   | -        | 178.01 |
| m. terme - A2      | 7.33      | 62.02    | -        | 177.84 | 13.14     | 111.98   | -        | 177.83 |
| l. terme - B1      | 7.33      | 70.50    | -        | 178.12 | 12.90     | 141.67   | -        | 178.14 |
| l. terme - A1B     | 6.75      | 57.92    | -        | 177.78 | 11.73     | 115.74   | -        | 177.87 |
| l. terme - A2      | 6.17      | 45.35    | -        | 177.44 | 10.57     | 89.81    | -        | 177.60 |

10.5.6.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 6 – b

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**

**Modèle DARWin-ME**

Mesure d'adaptation 6 - b

Durée de vie [an]

Sol S2 - Superstructure SS1

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 20.20     | -        | 1556.11  | 28.96     | -        | 4375.32  |
| c. terme - B1  | 17.69     | -        | 910.49   | 26.62     | -        | 3943.48  |
| c. terme - A1B | 17.59     | -        | 945.24   | 26.44     | -        | 2840.70  |
| c. terme - A2  | 17.49     | -        | 979.99   | 26.25     | -        | 1737.92  |
| m. terme - B1  | 16.49     | 914.04   | 1220.12  | 25.12     | -        | 1520.50  |
| m. terme - A1B | 16.40     | 711.85   | 1035.28  | 24.50     | -        | 1449.35  |
| m. terme - A2  | 16.31     | 509.66   | 850.44   | 23.88     | -        | 1378.19  |
| l. terme - B1  | 16.13     | 660.32   | 1097.58  | 24.46     | -        | 2744.33  |
| l. terme - A1B | 15.11     | 465.17   | 846.85   | 22.81     | -        | 2140.71  |
| l. terme - A2  | 14.08     | 270.02   | 596.12   | 21.16     | -        | 1537.09  |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**

**Modèle DARWin-ME**

Mesure d'adaptation 6 - b

Durée de vie [an]

Sol S3 - Superstructure SS1

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 28.09     | 288.15   | 1663.07  | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 24.53     | 185.77   | 958.39   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 24.42     | 181.23   | 983.75   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 24.31     | 176.68   | 1009.10  | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 23.44     | 203.95   | 1329.46  | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 23.09     | 176.87   | 1116.74  | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 22.73     | 149.79   | 904.01   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 22.83     | 186.62   | 1200.53  | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 21.26     | 146.86   | 923.90   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 19.69     | 107.09   | 647.27   | -         | -        | -        |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 13.00     | -        | 5481.75  | 20.32     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 11.13     | -        | 1522.96  | 18.46     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 11.06     | -        | 2088.29  | 18.37     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 10.98     | -        | 2653.63  | 18.29     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 10.17     | -        | 4379.12  | 17.23     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 10.12     | -        | 3255.92  | 16.82     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 10.07     | -        | 2132.71  | 16.42     | -        | 1021.37  |
| l. terme - B1  | 10.08     | -        | 4383.25  | 16.52     | -        | 18730.11 |
| l. terme - A1B | 9.25      | -        | 2703.43  | 15.23     | -        | 14223.16 |
| l. terme - A2  | 8.42      | 260.15   | 1023.60  | 13.94     | -        | 9716.21  |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 18.88     | -        | 5590.67  | 28.39     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 16.22     | 399.23   | 1606.96  | 25.75     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 16.17     | 378.81   | 3002.77  | 25.50     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 16.12     | 358.39   | 4398.59  | 25.24     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 15.10     | 399.85   | 6247.47  | 24.01     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 15.00     | 333.88   | 4205.96  | 23.41     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 14.90     | 267.91   | 2164.46  | 22.82     | -        | -        |
| l. terme - B1  | 14.72     | 369.62   | 6143.50  | 23.30     | -        | -        |
| l. terme - A1B | 13.65     | 281.97   | 3682.15  | 21.55     | -        | -        |
| l. terme - A2  | 12.58     | 194.32   | 1220.81  | 19.80     | 422.52   | 13389.52 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**

**Modèle DARWin-ME**

Mesure d'adaptation 6 - b

Durée de vie [an]

Sol S4 - Superstructure SS1

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 32.21     | 155.74   | 2201.05  | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 28.10     | 108.70   | 1230.41  | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 27.94     | 106.77   | 1246.63  | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 27.78     | 104.83   | 1262.85  | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 26.97     | 110.70   | 1774.36  | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 26.45     | 100.63   | 1444.21  | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 25.93     | 90.56    | 1114.05  | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 26.23     | 102.75   | 1586.14  | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 24.30     | 86.15    | 1184.43  | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 22.36     | 69.54    | 782.72   | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**

**Modèle DARWin-ME**

Mesure d'adaptation 6 - b

Durée de vie [an]

Sol S2 - Superstructure SS2

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 23.81     | -        | 574.36   | 32.82     | -        | 1255.27  |
| c. terme - B1  | 20.99     | -        | 382.79   | 30.66     | -        | 1112.71  |
| c. terme - A1B | 20.93     | -        | 391.05   | 30.39     | -        | 936.54   |
| c. terme - A2  | 20.87     | -        | 399.30   | 30.13     | -        | 760.37   |
| m. terme - B1  | 19.99     | -        | 461.96   | 29.06     | -        | 726.42   |
| m. terme - A1B | 19.74     | -        | 421.16   | 28.48     | -        | 668.19   |
| m. terme - A2  | 19.49     | -        | 380.36   | 27.89     | -        | 609.95   |
| l. terme - B1  | 19.47     | -        | 421.62   | 28.50     | -        | 934.54   |
| l. terme - A1B | 18.22     | -        | 358.88   | 26.76     | -        | 788.27   |
| l. terme - A2  | 16.97     | -        | 296.14   | 25.03     | -        | 642.00   |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.88     | 340.38   | 8337.33  | 32.51     | 616.57   | -        |
| c. terme - B1  | 18.81     | 226.94   | 2109.63  | 29.51     | 509.86   | -        |
| c. terme - A1B | 18.73     | 220.18   | 4993.02  | 29.16     | 439.88   | -        |
| c. terme - A2  | 18.65     | 213.41   | 7876.40  | 28.81     | 369.90   | -        |
| m. terme - B1  | 17.67     | 237.13   | 14397.64 | 27.50     | 366.48   | -        |
| m. terme - A1B | 17.42     | 204.91   | 8693.50  | 26.75     | 321.99   | -        |
| m. terme - A2  | 17.17     | 172.69   | 2989.37  | 26.00     | 277.50   | -        |
| l. terme - B1  | 17.20     | 219.68   | 12166.61 | 26.83     | 396.33   | -        |
| l. terme - A1B | 15.86     | 169.27   | 6844.03  | 24.69     | 325.81   | -        |
| l. terme - A2  | 14.52     | 118.86   | 1521.45  | 22.56     | 255.28   | -        |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 28.21     | -        | 6382.11  | 38.82     | -        | -        |
| c. terme - B1  | 24.74     | -        | 1162.92  | 36.12     | -        | -        |
| c. terme - A1B | 24.61     | -        | 3254.85  | 35.62     | -        | -        |
| c. terme - A2  | 24.49     | -        | 5346.79  | 35.12     | -        | -        |
| m. terme - B1  | 23.61     | -        | 6403.02  | 34.05     | -        | -        |
| m. terme - A1B | 23.31     | -        | 4594.49  | 33.17     | -        | -        |
| m. terme - A2  | 23.01     | -        | 2785.97  | 32.30     | -        | -        |
| l. terme - B1  | 23.05     | -        | 6728.57  | 33.25     | -        | -        |
| l. terme - A1B | 21.60     | -        | 3946.63  | 31.18     | -        | -        |
| l. terme - A2  | 20.15     | -        | 1164.69  | 29.10     | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario           | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 28.41     | 266.33   | 425.84   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | 24.92     | 178.51   | 290.41   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | 24.82     | 175.72   | 294.45   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | 24.72     | 172.93   | 298.49   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | 23.82     | 188.20   | 331.64   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | 23.40     | 165.67   | 306.24   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | 22.98     | 143.14   | 280.85   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | 23.15     | 176.86   | 306.35   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | 21.48     | 140.26   | 262.58   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 19.81     | 103.66   | 218.81   | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS2**

| Scénario           | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 28.69     | 222.78   | 159.96   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | 25.27     | 134.54   | 111.02   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | 25.18     | 131.79   | 111.25   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | 25.09     | 129.04   | 111.49   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | 24.23     | 138.08   | 114.67   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | 23.73     | 119.20   | 106.39   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | 23.23     | 100.32   | 98.11    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | 23.50     | 127.59   | 108.30   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | 21.78     | 97.13    | 92.10    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 20.06     | 66.67    | 75.90    | -         | -        | -        |

| Scénario           | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 27.34     | -        | 3263.66  | 38.81     | -        | -        |
| c. terme - B1      | 23.84     | -        | 955.32   | 35.53     | -        | -        |
| c. terme - A1B     | 23.74     | -        | 1275.37  | 35.08     | -        | -        |
| c. terme - A2      | 23.63     | -        | 1595.42  | 34.64     | -        | -        |
| m. terme - B1      | 22.79     | -        | 2340.00  | 33.32     | -        | -        |
| m. terme - A1B     | 22.45     | -        | 1726.55  | 32.49     | -        | -        |
| m. terme - A2      | 22.10     | -        | 1113.09  | 31.67     | -        | 336.60   |
| l. terme - B1      | 22.19     | -        | 2300.30  | 32.67     | -        | 5334.86  |
| l. terme - A1B     | 20.68     | -        | 1470.71  | 30.45     | -        | 6189.71  |
| l. terme - A2      | 19.17     | -        | 641.12   | 28.23     | -        | 7044.57  |

| Scénario           | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 27.75     | -        | 845.23   | 38.87     | -        | 5492.03  |
| c. terme - B1      | 24.23     | -        | 344.61   | 35.84     | -        | 10581.15 |
| c. terme - A1B     | 24.14     | -        | 364.84   | 35.43     | -        | 5584.62  |
| c. terme - A2      | 24.05     | -        | 385.07   | 35.01     | -        | 588.08   |
| m. terme - B1      | 23.17     | 624.82   | 474.78   | 33.67     | -        | 847.26   |
| m. terme - A1B     | 22.77     | 532.80   | 394.28   | 32.79     | -        | 633.67   |
| m. terme - A2      | 22.37     | 440.77   | 313.78   | 31.90     | -        | 420.08   |
| l. terme - B1      | 22.53     | 563.11   | 450.53   | 33.01     | -        | 2499.32  |
| l. terme - A1B     | 20.95     | 428.41   | 327.24   | 30.66     | -        | 1621.87  |
| l. terme - A2      | 19.38     | 293.71   | 203.96   | 28.31     | -        | 744.41   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 20.23     | 52.83    | -        | 294.18 | 30.03     | 93.58    | -        | 293.46 |
| c. terme - B1      | 17.33     | 40.86    | -        | 294.37 | 27.39     | 79.37    | -        | 293.51 |
| c. terme - A1B     | 17.27     | 40.27    | -        | 294.35 | 27.11     | 76.25    | -        | 293.46 |
| c. terme - A2      | 17.22     | 39.67    | -        | 294.33 | 26.83     | 73.12    | -        | 293.41 |
| m. terme - B1      | 16.13     | 38.34    | -        | 294.25 | 25.34     | 69.61    | -        | 293.62 |
| m. terme - A1B     | 15.92     | 36.27    | -        | 294.30 | 24.64     | 64.56    | -        | 293.55 |
| m. terme - A2      | 15.71     | 34.20    | -        | 294.34 | 23.95     | 59.51    | -        | 293.48 |
| l. terme - B1      | 15.64     | 36.17    | -        | 294.35 | 24.59     | 68.68    | -        | 293.64 |
| l. terme - A1B     | 14.36     | 31.30    | -        | 294.32 | 22.60     | 58.66    | -        | 293.58 |
| l. terme - A2      | 13.08     | 26.42    | -        | 294.29 | 20.62     | 48.63    | -        | 293.52 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 22.96     | 175.47   | -        | 298.32 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | 19.70     | 120.27   | -        | 298.19 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | 19.63     | 116.74   | -        | 298.03 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | 19.56     | 113.21   | -        | 297.87 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | 18.52     | 117.73   | -        | 298.04 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | 18.23     | 105.69   | -        | 297.79 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | 17.93     | 93.65    | -        | 297.55 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | 17.96     | 109.41   | -        | 297.99 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | 16.53     | 88.61    | -        | 297.54 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 15.09     | 67.81    | -        | 297.10 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 9.00      | 16.74    | -        | 176.42 | 14.64     | 27.00    | -        | 175.95 |
| c. terme - B1      | 7.25      | 14.09    | -        | 176.62 | 12.97     | 24.16    | -        | 176.04 |
| c. terme - A1B     | 7.21      | 14.02    | -        | 176.58 | 13.00     | 23.86    | -        | 176.01 |
| c. terme - A2      | 7.17      | 13.95    | -        | 176.55 | 13.02     | 23.55    | -        | 175.97 |
| m. terme - B1      | 6.33      | 12.77    | -        | 176.53 | 11.96     | 21.80    | -        | 176.05 |
| m. terme - A1B     | 6.33      | 12.47    | -        | 176.54 | 11.75     | 20.99    | -        | 176.07 |
| m. terme - A2      | 6.33      | 12.17    | -        | 176.56 | 11.54     | 20.17    | -        | 176.09 |
| l. terme - B1      | 6.25      | 12.13    | -        | 176.54 | 11.16     | 20.80    | -        | 176.25 |
| l. terme - A1B     | 5.71      | 10.69    | -        | 176.54 | 10.17     | 18.50    | -        | 176.20 |
| l. terme - A2      | 5.17      | 9.25     | -        | 176.54 | 9.17      | 16.20    | -        | 176.15 |

| Scénario           | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 10.41     | 31.09    | -        | 177.48 | 17.08     | 50.92    | -        | 177.24 |
| c. terme - B1      | 9.08      | 25.30    | -        | 177.49 | 15.31     | 44.93    | -        | 177.22 |
| c. terme - A1B     | 9.08      | 25.01    | -        | 177.46 | 15.29     | 43.81    | -        | 177.17 |
| c. terme - A2      | 9.08      | 24.72    | -        | 177.43 | 15.27     | 42.68    | -        | 177.12 |
| m. terme - B1      | 8.08      | 23.30    | -        | 177.48 | 14.11     | 40.07    | -        | 177.14 |
| m. terme - A1B     | 8.08      | 22.35    | -        | 177.35 | 13.83     | 37.81    | -        | 177.12 |
| m. terme - A2      | 8.08      | 21.39    | -        | 177.21 | 13.56     | 35.55    | -        | 177.09 |
| l. terme - B1      | 8.08      | 22.05    | -        | 177.38 | 13.34     | 38.69    | -        | 177.13 |
| l. terme - A1B     | 7.17      | 19.40    | -        | 177.22 | 12.13     | 33.69    | -        | 177.02 |
| l. terme - A2      | 6.25      | 16.75    | -        | 177.05 | 10.93     | 28.69    | -        | 176.91 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - b**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 25.11     | 334.48   | -        | 294.68 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | 21.54     | 224.53   | -        | 294.44 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | 21.44     | 212.61   | -        | 294.26 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | 21.35     | 200.70   | -        | 294.08 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | 20.34     | 219.77   | -        | 294.12 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | 19.98     | 190.19   | -        | 293.81 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | 19.62     | 160.62   | -        | 293.50 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | 19.74     | 202.75   | -        | 294.14 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | 18.15     | 156.49   | -        | 293.53 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 16.57     | 110.22   | -        | 292.93 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | T6        |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 11.41     | 67.00    | -        | 177.19 | 18.33     | 112.98   | -        | 177.26 |
| c. terme - B1      | 10.08     | 51.20    | -        | 177.15 | 16.52     | 97.22    | -        | 177.10 |
| c. terme - A1B     | 9.71      | 50.14    | -        | 177.03 | 16.48     | 92.60    | -        | 177.04 |
| c. terme - A2      | 9.33      | 49.09    | -        | 176.90 | 16.44     | 87.99    | -        | 176.97 |
| m. terme - B1      | 9.00      | 47.93    | -        | 176.91 | 15.29     | 85.82    | -        | 177.00 |
| m. terme - A1B     | 8.75      | 44.65    | -        | 176.75 | 14.93     | 78.54    | -        | 176.89 |
| m. terme - A2      | 8.50      | 41.37    | -        | 176.60 | 14.58     | 71.26    | -        | 176.77 |
| l. terme - B1      | 8.33      | 44.90    | -        | 176.87 | 14.44     | 84.15    | -        | 177.02 |
| l. terme - A1B     | 7.75      | 38.05    | -        | 176.61 | 13.17     | 70.82    | -        | 176.81 |
| l. terme - A2      | 7.17      | 31.21    | -        | 176.35 | 11.90     | 57.48    | -        | 176.60 |

10.5.6.3. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 6 – c

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 6 - c  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S2 - Superstructure SS1  |  |  |  |  |  |  |

| Scénario       | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 12.81     | 47.87    | 160.55   | 19.30     | 85.20    | 180.39   |
| c. terme - B1  | 11.08     | 39.53    | 124.58   | 17.75     | 68.80    | 260.18   |
| c. terme - A1B | 11.08     | 39.25    | 125.01   | 17.75     | 66.51    | 242.19   |
| c. terme - A2  | 11.08     | 38.98    | 125.43   | 17.75     | 64.23    | 224.21   |
| m. terme - B1  | 10.10     | 38.22    | 129.71   | 16.75     | 61.21    | 210.72   |
| m. terme - A1B | 10.23     | 37.26    | 123.36   | 16.50     | 58.14    | 200.65   |
| m. terme - A2  | 10.35     | 36.31    | 117.00   | 16.25     | 55.06    | 190.58   |
| l. terme - B1  | 10.17     | 36.69    | 122.88   | 16.14     | 61.72    | 235.99   |
| l. terme - A1B | 9.63      | 34.08    | 109.82   | 15.07     | 55.33    | 206.65   |
| l. terme - A2  | 9.08      | 31.46    | 96.77    | 14.00     | 48.93    | 177.31   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 6 - c  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S3 - Superstructure SS1  |  |  |  |  |  |  |

| Scénario       | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 19.67     | 21.07    | 166.24   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 16.95     | 18.02    | 124.39   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 16.91     | 17.94    | 124.52   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 16.87     | 17.87    | 124.64   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 15.92     | 16.84    | 130.32   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 15.75     | 16.73    | 123.24   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 15.58     | 16.62    | 116.15   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 15.41     | 16.57    | 122.67   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 14.36     | 15.43    | 109.08   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 13.31     | 14.28    | 95.48    | -         | -        | -        |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 7.00      | 248.26   | 437.08   | 10.94     | 434.79   | 1150.29  |
| c. terme - B1  | 6.08      | 157.35   | 280.87   | 10.17     | 357.78   | 944.24   |
| c. terme - A1B | 6.04      | 159.76   | 289.30   | 10.17     | 352.38   | 764.32   |
| c. terme - A2  | 6.00      | 162.17   | 297.73   | 10.17     | 346.97   | 584.41   |
| m. terme - B1  | 5.17      | 185.38   | 339.09   | 9.17      | 395.66   | 545.01   |
| m. terme - A1B | 5.17      | 163.33   | 304.80   | 9.13      | 347.81   | 511.06   |
| m. terme - A2  | 5.17      | 141.28   | 270.50   | 9.08      | 299.97   | 477.10   |
| l. terme - B1  | 5.17      | 156.22   | 317.66   | 9.00      | 424.21   | 763.98   |
| l. terme - A1B | 4.71      | 125.49   | 259.05   | 8.13      | 326.13   | 617.60   |
| l. terme - A2  | 4.25      | 94.75    | 200.44   | 7.25      | 228.05   | 471.21   |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 10.19     | 74.52    | 482.07   | 16.80     | 182.50   | 1362.27  |
| c. terme - B1  | 9.08      | 53.39    | 300.38   | 15.14     | 134.50   | 1241.18  |
| c. terme - A1B | 9.04      | 52.58    | 312.41   | 15.14     | 119.39   | 931.10   |
| c. terme - A2  | 9.00      | 51.77    | 324.43   | 15.15     | 104.28   | 621.02   |
| m. terme - B1  | 8.08      | 51.73    | 365.98   | 14.07     | 100.32   | 569.21   |
| m. terme - A1B | 8.08      | 48.23    | 326.15   | 13.81     | 91.71    | 535.52   |
| m. terme - A2  | 8.08      | 44.73    | 286.32   | 13.56     | 83.11    | 501.83   |
| l. terme - B1  | 8.08      | 48.81    | 339.70   | 13.33     | 108.82   | 861.41   |
| l. terme - A1B | 7.21      | 41.40    | 274.09   | 12.23     | 88.59    | 701.19   |
| l. terme - A2  | 6.33      | 33.99    | 208.49   | 11.12     | 68.36    | 540.97   |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 6 - c  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S4 - Superstructure SS1  |  |  |  |  |  |  |

| Scénario       | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 23.99     | 16.52    | 195.72   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 20.79     | 14.27    | 144.39   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 20.69     | 14.27    | 145.13   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 20.59     | 14.27    | 145.87   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 19.66     | 13.37    | 154.77   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 19.40     | 13.26    | 145.09   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 19.14     | 13.15    | 135.40   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 19.14     | 13.00    | 146.35   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 17.74     | 12.22    | 127.64   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 16.35     | 11.44    | 108.94   | -         | -        | -        |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 6 - c  |  |  |  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  |  |  |  |
| Sol S2 - Superstructure SS2  |  |  |  |  |  |  |

| Scénario       | T5        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 13.92     | 143.71   | 86.31    | 20.48     | 276.30   | 148.61   |
| c. terme - B1  | 12.09     | 103.36   | 69.73    | 18.97     | 245.09   | 132.32   |
| c. terme - A1B | 12.08     | 102.11   | 70.11    | 18.91     | 215.37   | 127.53   |
| c. terme - A2  | 12.08     | 100.86   | 70.50    | 18.84     | 185.65   | 122.73   |
| m. terme - B1  | 11.07     | 105.03   | 69.89    | 17.88     | 182.22   | 115.76   |
| m. terme - A1B | 11.13     | 98.27    | 68.02    | 17.61     | 165.64   | 111.09   |
| m. terme - A2  | 11.19     | 91.51    | 66.15    | 17.33     | 149.05   | 106.41   |
| l. terme - B1  | 10.85     | 98.03    | 67.45    | 17.29     | 204.67   | 121.87   |
| l. terme - A1B | 10.09     | 84.74    | 62.43    | 16.15     | 173.24   | 109.34   |
| l. terme - A2  | 9.33      | 71.45    | 57.40    | 15.01     | 141.80   | 96.81    |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 13.04     | 44.74    | 639.37   | 20.66     | 93.50    | 2057.77  |
| c. terme - B1  | 11.04     | 34.18    | 377.29   | 18.72     | 73.86    | 2083.33  |
| c. terme - A1B | 11.03     | 33.76    | 390.97   | 18.62     | 68.94    | 1424.68  |
| c. terme - A2  | 11.02     | 33.33    | 404.66   | 18.52     | 64.01    | 766.04   |
| m. terme - B1  | 10.17     | 32.13    | 473.59   | 17.39     | 60.09    | 667.23   |
| m. terme - A1B | 10.17     | 30.73    | 415.35   | 16.99     | 56.00    | 635.88   |
| m. terme - A2  | 10.17     | 29.32    | 357.10   | 16.60     | 51.92    | 604.54   |
| l. terme - B1  | 10.08     | 30.58    | 445.45   | 16.63     | 61.09    | 1174.81  |
| l. terme - A1B | 9.13      | 27.08    | 346.98   | 15.23     | 52.24    | 921.45   |
| l. terme - A2  | 8.17      | 23.58    | 248.52   | 13.84     | 43.40    | 668.08   |

| Scénario       | T6        |          |          | 99300     |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 12.98     | -        | 399.44   | 20.16     | -        | 1174.47  |
| c. terme - B1  | 11.13     | -        | 250.57   | 18.30     | -        | 1472.46  |
| c. terme - A1B | 11.14     | -        | 256.65   | 18.24     | -        | 1030.85  |
| c. terme - A2  | 11.15     | -        | 262.73   | 18.19     | -        | 589.24   |
| m. terme - B1  | 10.10     | -        | 304.67   | 17.11     | -        | 494.39   |
| m. terme - A1B | 10.18     | -        | 276.64   | 16.82     | -        | 460.03   |
| m. terme - A2  | 10.26     | -        | 248.60   | 16.53     | -        | 425.66   |
| l. terme - B1  | 10.17     | -        | 289.69   | 16.45     | -        | 836.24   |
| l. terme - A1B | 9.63      | -        | 235.04   | 15.27     | -        | 658.06   |
| l. terme - A2  | 9.08      | 672.00   | 180.39   | 14.10     | -        | 479.88   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 18.38     | 25.56    | 56.77    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 16.08     | 21.53    | 47.11    | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 16.06     | 21.49    | 47.07    | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 16.04     | 21.45    | 47.03    | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 15.02     | 20.41    | 46.27    | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 14.89     | 20.09    | 45.56    | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 14.75     | 19.77    | 44.85    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 14.61     | 19.82    | 44.62    | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 13.54     | 18.36    | 41.63    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 12.47     | 16.91    | 38.65    | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS2**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 19.01     | 16.42    | 24.73    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 16.69     | 13.28    | 20.50    | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 16.65     | 13.10    | 20.37    | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 16.62     | 12.91    | 20.24    | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 15.68     | 11.61    | 18.94    | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 15.49     | 11.38    | 18.67    | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 15.31     | 11.16    | 18.40    | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 15.23     | 10.97    | 18.16    | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 14.10     | 9.57     | 16.74    | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 12.98     | 8.17     | 15.31    | -         | -        | -        |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.81     | 130.81   | 202.78   | 22.87     | 353.64   | 541.44   |
| c. terme - B1  | 12.65     | 86.65    | 136.43   | 20.71     | 265.28   | 444.09   |
| c. terme - A1B | 12.63     | 85.53    | 139.36   | 20.59     | 222.56   | 362.69   |
| c. terme - A2  | 12.61     | 84.40    | 142.30   | 20.47     | 179.84   | 281.28   |
| m. terme - B1  | 11.56     | 88.15    | 149.89   | 19.30     | 173.65   | 265.30   |
| m. terme - A1B | 11.59     | 79.44    | 139.93   | 18.87     | 155.21   | 249.89   |
| m. terme - A2  | 11.61     | 70.74    | 129.96   | 18.44     | 136.77   | 234.49   |
| l. terme - B1  | 11.29     | 82.83    | 139.92   | 18.58     | 205.45   | 340.47   |
| l. terme - A1B | 10.68     | 66.76    | 120.22   | 17.16     | 161.48   | 283.77   |
| l. terme - A2  | 10.08     | 50.69    | 100.53   | 15.75     | 117.51   | 227.08   |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.10     | 126.14   | 82.50    | 22.55     | 224.55   | 196.39   |
| c. terme - B1  | 12.92     | 75.43    | 56.83    | 20.51     | 181.93   | 165.93   |
| c. terme - A1B | 12.91     | 73.56    | 56.46    | 20.40     | 169.51   | 146.56   |
| c. terme - A2  | 12.90     | 71.68    | 56.10    | 20.29     | 157.10   | 127.18   |
| m. terme - B1  | 11.83     | 73.56    | 55.89    | 19.45     | 155.61   | 116.75   |
| m. terme - A1B | 11.80     | 65.34    | 52.87    | 19.02     | 141.61   | 106.23   |
| m. terme - A2  | 11.76     | 57.13    | 49.86    | 18.59     | 127.61   | 95.70    |
| l. terme - B1  | 11.52     | 68.71    | 52.71    | 18.70     | 158.30   | 126.15   |
| l. terme - A1B | 10.80     | 53.14    | 45.12    | 17.23     | 136.11   | 104.86   |
| l. terme - A2  | 10.08     | 37.58    | 37.52    | 15.77     | 113.92   | 83.58    |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SSS**

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 15.18     | 185.54   | -        | 302.99 | 23.37     | 325.01   | -        | 302.25 |
| c. terme - B1  | 12.88     | 129.96   | -        | 303.08 | 21.32     | 267.20   | -        | 302.31 |
| c. terme - A1B | 12.86     | 127.15   | -        | 303.05 | 21.17     | 250.16   | -        | 302.25 |
| c. terme - A2  | 12.84     | 124.34   | -        | 303.01 | 21.02     | 233.13   | -        | 302.19 |
| m. terme - B1  | 11.69     | 129.52   | -        | 303.01 | 19.72     | 226.61   | -        | 302.32 |
| m. terme - A1B | 11.64     | 117.36   | -        | 302.92 | 19.18     | 204.37   | -        | 302.25 |
| m. terme - A2  | 11.60     | 105.20   | -        | 302.83 | 18.64     | 182.14   | -        | 302.19 |
| l. terme - B1  | 11.31     | 119.96   | -        | 303.02 | 18.88     | 234.12   | -        | 302.28 |
| l. terme - A1B | 10.32     | 99.73    | -        | 302.86 | 17.29     | 194.31   | -        | 302.19 |
| l. terme - A2  | 9.33      | 79.50    | -        | 302.71 | 15.69     | 154.49   | -        | 302.10 |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| réf.1          | 17.67     | -        | -        | 306.15 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 15.05     | -        | -        | 305.98 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 15.01     | -        | -        | 305.77 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 14.98     | -        | -        | 305.57 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 13.86     | -        | -        | 305.64 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 13.74     | -        | -        | 305.30 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 13.62     | -        | -        | 304.95 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 13.42     | -        | -        | 305.54 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 12.33     | -        | -        | 304.91 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 11.23     | -        | -        | 304.28 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 6.08      | 37.27    | -        | 181.22 | 10.08     | 61.99    | -        | 180.87 |
| c. terme - B1  | 5.08      | 29.85    | -        | 181.26 | 10.00     | 54.40    | -        | 180.84 |
| c. terme - A1B | 5.08      | 29.48    | -        | 181.24 | 9.58      | 52.74    | -        | 180.82 |
| c. terme - A2  | 5.08      | 29.12    | -        | 181.22 | 9.17      | 51.08    | -        | 180.80 |
| m. terme - B1  | 4.17      | 27.66    | -        | 181.27 | 8.17      | 48.20    | -        | 180.86 |
| m. terme - A1B | 4.17      | 26.45    | -        | 181.26 | 8.13      | 45.20    | -        | 180.81 |
| m. terme - A2  | 4.17      | 25.24    | -        | 181.24 | 8.08      | 42.20    | -        | 180.75 |
| l. terme - B1  | 4.17      | 26.17    | -        | 181.27 | 7.33      | 46.66    | -        | 180.84 |
| l. terme - A1B | 3.71      | 22.97    | -        | 181.24 | 6.75      | 40.43    | -        | 180.80 |
| l. terme - A2  | 3.25      | 19.78    | -        | 181.20 | 6.17      | 34.20    | -        | 180.77 |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 7.17      | 104.17   | -        | 182.18 | 12.03     | 181.47   | -        | 182.18 |
| c. terme - B1  | 6.17      | 76.06    | -        | 182.10 | 10.72     | 155.54   | -        | 181.98 |
| c. terme - A1B | 6.13      | 74.12    | -        | 182.03 | 10.81     | 146.18   | -        | 181.95 |
| c. terme - A2  | 6.08      | 72.19    | -        | 181.96 | 10.90     | 136.83   | -        | 181.93 |
| m. terme - B1  | 5.17      | 72.27    | -        | 182.01 | 10.08     | 133.17   | -        | 181.94 |
| m. terme - A1B | 5.17      | 66.28    | -        | 181.86 | 9.67      | 119.67   | -        | 181.82 |
| m. terme - A2  | 5.17      | 60.28    | -        | 181.71 | 9.25      | 106.17   | -        | 181.70 |
| l. terme - B1  | 5.17      | 67.27    | -        | 181.96 | 9.17      | 133.20   | -        | 181.95 |
| l. terme - A1B | 4.67      | 55.91    | -        | 181.74 | 8.25      | 109.76   | -        | 181.78 |
| l. terme - A2  | 4.17      | 44.55    | -        | 181.51 | 7.33      | 86.31    | -        | 181.61 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 6 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| réf.1          | 19.71     | -        | -        | 301.20 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 16.84     | -        | -        | 300.69 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | 16.79     | -        | -        | 300.54 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 16.74     | -        | -        | 300.38 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 15.65     | -        | -        | 300.55 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | 15.45     | -        | -        | 299.99 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 15.25     | -        | -        | 299.44 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 15.14     | -        | -        | 300.33 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | 13.91     | -        | -        | 299.47 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 12.69     | -        | -        | 298.61 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 8.08      | 404.33   | -        | 180.86 | 12.84     | -        | -        | 180.89 |
| c. terme - B1  | 7.00      | 283.28   | -        | 180.68 | 11.79     | -        | -        | 180.84 |
| c. terme - A1B | 6.67      | 266.40   | -        | 180.57 | 11.87     | -        | -        | 180.80 |
| c. terme - A2  | 6.33      | 249.51   | -        | 180.47 | 11.94     | -        | -        | 180.76 |
| m. terme - B1  | 6.08      | 291.73   | -        | 180.50 | 10.85     | -        | -        | 180.83 |
| m. terme - A1B | 6.08      | 247.28   | -        | 180.29 | 10.67     | -        | -        | 180.57 |
| m. terme - A2  | 6.08      | 202.83   | -        | 180.07 | 10.49     | 413.20   | -        | 180.30 |
| l. terme - B1  | 6.08      | 263.42   | -        | 180.47 | 10.01     | 678.90   | -        | 180.57 |
| l. terme - A1B | 5.54      | 199.68   | -        | 180.03 | 9.13      | 481.53   | -        | 180.28 |
| l. terme - A2  | 5.00      | 135.93   | -        | 179.59 | 8.25      | 284.16   | -        | 180.00 |

10.5.6.4. Analyse de risque : Mesure 6 – a

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Mesure d'adaptation 6 - a  
 Analyse de risque - Catégorie de risque  
 Région "intermédiaire"

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 24.3 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           | -           | -           | -           |
| moyen-terme | 0.0%            | 22.5 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           | -           | -           | -           |
| long-terme  | 33.3%           | 20.8 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable        | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Faible          |             | -           | -           | -           | -           |

| Trafic T6   |               |             |               |             |             |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 18.3 ans    | 33.3%         | 21.3 ans    | 33.3%       | 22.8 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      | Probable    | Faible      |
|             | Elevée        |             | Faible        |             | Faible      |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 16.8 ans    | 55.6%         | 19.5 ans    | 33.3%       | 20.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     | Probable    | Faible      |
|             | Elevée        |             | Moyenne       |             | Faible      |             |
| long-terme  | 66.7%         | 15.3 ans    | 66.7%         | 17.8 ans    | 44.4%       | 19.1 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Probable    | Moyenne     |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Moyenne     |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
 Modèle DARWin-ME  
 Mesure d'adaptation 6 - a  
 Analyse de risque - Catégorie de risque  
 Région "chaude"

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 15.8 ans    | 33.3%         | 19.9 ans    | 33.3%         | 21.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Elevée        |             | Moyenne       |             | Faible        |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 14.7 ans    | 77.8%         | 18.7 ans    | 33.3%         | 20.6 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Faible        |             |
| long-terme  | 100.0%        | 13.4 ans    | 88.9%         | 17.0 ans    | 66.7%         | 18.8 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 11.4 ans    | 100.0%        | 13.3 ans    | 100.0%        | 14.4 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 10.6 ans    | 100.0%        | 12.2 ans    | 100.0%        | 13.3 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 9.6 ans     | 100.0%        | 11.1 ans    | 100.0%        | 12.0 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |



## 10.5.6.5. Analyse de risque : Mesure 6 – b

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>   |
| <b>Mesure d'adaptation 6 - b</b>  |
| <b>Analyse de risque - Catégorie de risque</b>                                    |
| <b>Région "intermédiaire"</b>   |

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 28.0 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 25.9 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| long-terme  | 0.0%            | 24.1 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |

| Trafic T6   |               |             |             |             |             |             |
|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 22.3 ans    | 33.3%       | 25.3 ans    | 33.3%       | 27.0 ans    |
|             | Très probable | Faible      | Probable    | Faible      | Probable    | Faible      |
|             | Moyenne       |             | Faible      |             | Faible      |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 20.6 ans    | 33.3%       | 23.2 ans    | 33.3%       | 24.8 ans    |
|             | Très probable | Faible      | Probable    | Faible      | Probable    | Faible      |
|             | Moyenne       |             | Faible      |             | Faible      |             |
| long-terme  | 66.7%         | 18.9 ans    | 44.4%       | 21.4 ans    | 33.3%       | 22.8 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable    | Faible      | Probable    | Faible      |
|             | Elevée        |             | Faible      |             | Faible      |             |

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>   |
| <b>Mesure d'adaptation 6 - b</b>  |
| <b>Analyse de risque - Catégorie de risque</b>                                    |
| <b>Région "chaude"</b>  |

| Trafic T5   |               |             |             |             |                 |             |
|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3      |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 18.6 ans    | 33.3%       | 23.0 ans    | 0.0%            | 24.9 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable    | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Elevée        |             | Faible      |             | Très faible     |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 17.4 ans    | 33.3%       | 21.6 ans    | 22.2%           | 23.4 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable    | Faible      | Improbable      | Faible      |
|             | Elevée        |             | Faible      |             | Très faible     |             |
| long-terme  | 100.0%        | 15.9 ans    | 55.6%       | 19.8 ans    | 33.3%           | 21.4 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Probable    | Moyenne     | Probable        | Faible      |
|             | Elevée        |             | Moyenne     |             | Faible          |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 14.3 ans    | 66.7%         | 16.3 ans    | 66.7%         | 17.5 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 13.3 ans    | 66.7%         | 15.2 ans    | 66.7%         | 16.3 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 66.7%         | 12.2 ans    | 77.8%         | 13.8 ans    | 77.8%         | 14.9 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

10.5.6.6. Analyse de risque : Mesure 6 – c

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 6 - c*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "intermédiaire"*

| <i>Trafic T5</i> |               |             |             |             |             |             |
|------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme      | 66.7%         | 19.3 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Très probable | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|                  | Elevée        |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 17.8 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Très probable | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|                  | Elevée        |             | -           |             | -           |             |
| long-terme       | 100.0%        | 16.2 ans    | -           | -           | -           | -           |
|                  | Très probable | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|                  | Elevée        |             | -           |             | -           |             |

| <i>Trafic T6</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 100.0%        | 12.7 ans    | 66.7%         | 15.4 ans    | 66.7%         | 17.0 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevé    |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 11.4 ans    | 100.0%        | 14.1 ans    | 100.0%        | 15.6 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevé    |             | Très élevé    |             | Elevée        |             |
| long-terme       | 100.0%        | 10.0 ans    | 100.0%        | 12.5 ans    | 100.0%        | 13.9 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevé    |             | Très élevé    |             | Très élevé    |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
*Modèle DARWin-ME*  
*Mesure d'adaptation 6 - c*  
*Analyse de risque - Catégorie de risque*  
*Région "chaude"*

| <i>Trafic T5</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 100.0%        | 12.0 ans    | 100.0%        | 16.0 ans    | 100.0%        | 14.7 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Elevée        |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 11.0 ans    | 100.0%        | 14.8 ans    | 100.0%        | 13.4 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme       | 100.0%        | 10.0 ans    | 100.0%        | 13.4 ans    | 100.0%        | 11.9 ans    |
|                  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

| <i>Trafic T6</i> |               |             |               |             |               |             |
|------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario         | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|                  | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme      | 100.0%        | 7.4 ans     | 100.0%        | 9.3 ans     | 66.7%         | 17.8 ans    |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |
| moyen-terme      | 100.0%        | 6.5 ans     | 100.0%        | 8.3 ans     | 66.7%         | 16.2 ans    |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Moyenne     |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Elevée        |             |
| long-terme       | 100.0%        | 6.0 ans     | 100.0%        | 7.5 ans     | 66.7%         | 14.5 ans    |
|                  | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       |
|                  | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

10.5.7. Mesure 7 : Adaptation du grade des liants composant les couches de surface

10.5.7.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>  | <b>Modèle DARWin-ME</b>  |
| <b>Mesure d'adaptation 7</b>   | <b>Mesure d'adaptation 7</b>   |
| <b>Durée de vie [an]</b>   | <b>Durée de vie [an]</b>   |
| <b>Sol S2 - Superstructure SS1</b>   | <b>Sol S3 - Superstructure SS1</b>   |

| T5             |           |          |          |           |          |          | T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          | Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 15.51     | 117.45   | 330.28   | 22.79     | 245.28   | 671.19   | réf.1          | 22.53     | 48.56    | 344.21   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | 13.41     | 89.09    | 237.27   | 21.24     | 204.39   | 585.67   | c. terme - B1  | 19.47     | 36.64    | 241.56   | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | 13.38     | 88.47    | 238.99   | 21.12     | 182.40   | 511.34   | c. terme - A1B | 19.39     | 36.64    | 243.19   | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | 13.36     | 87.85    | 240.71   | 21.00     | 160.40   | 437.02   | c. terme - A2  | 19.31     | 36.64    | 244.83   | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | 12.39     | 90.76    | 261.98   | 19.96     | 152.79   | 412.45   | m. terme - B1  | 18.34     | 35.74    | 274.85   | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | 12.43     | 85.49    | 243.07   | 19.58     | 138.49   | 388.60   | m. terme - A1B | 18.12     | 34.37    | 251.07   | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | 12.47     | 80.21    | 224.16   | 19.19     | 124.18   | 364.75   | m. terme - A2  | 17.90     | 33.00    | 227.29   | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | 12.09     | 83.78    | 245.32   | 19.32     | 165.21   | 506.95   | l. terme - B1  | 17.82     | 34.15    | 256.78   | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | 11.29     | 73.89    | 212.61   | 17.97     | 140.35   | 432.81   | l. terme - A1B | 16.58     | 30.65    | 217.56   | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.49     | 63.99    | 179.90   | 16.61     | 115.50   | 358.67   | l. terme - A2  | 15.34     | 27.15    | 178.35   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          | T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 8.83      | 600.93   | 916.15   | 14.01     | -        | 3010.24  | réf.1          | 13.40     | 223.84   | 1097.58  | 20.84     | 435.32   | 4126.06  |
| c. terme - B1  | 7.25      | 439.60   | 527.97   | 12.80     | -        | 3801.28  | c. terme - B1  | 11.26     | 141.22   | 568.31   | 19.22     | 357.14   | 6691.43  |
| c. terme - A1B | 7.21      | 427.60   | 547.93   | 12.86     | -        | 2464.77  | c. terme - A1B | 11.25     | 138.37   | 598.47   | 19.10     | 333.97   | 3920.42  |
| c. terme - A2  | 7.17      | 415.61   | 567.90   | 12.91     | -        | 1128.26  | c. terme - A2  | 11.24     | 135.52   | 628.63   | 18.97     | 310.79   | 1149.42  |
| m. terme - B1  | 6.33      | 480.04   | 707.87   | 11.91     | -        | 946.29   | m. terme - B1  | 10.12     | 152.90   | 816.81   | 17.78     | 336.41   | 1016.89  |
| m. terme - A1B | 6.33      | 446.93   | 613.86   | 11.62     | -        | 886.93   | m. terme - A1B | 10.18     | 132.19   | 690.18   | 17.37     | 303.91   | 955.04   |
| m. terme - A2  | 6.33      | 413.83   | 519.86   | 11.34     | -        | 827.57   | m. terme - A2  | 10.24     | 111.49   | 563.55   | 16.95     | 271.40   | 893.18   |
| l. terme - B1  | 6.25      | 437.11   | 673.96   | 11.13     | -        | 1677.64  | l. terme - B1  | 10.17     | 142.54   | 748.83   | 17.05     | 329.91   | 2371.73  |
| l. terme - A1B | 5.79      | 330.18   | 523.70   | 10.19     | -        | 1315.90  | l. terme - A1B | 9.25      | 110.07   | 567.49   | 15.63     | 259.84   | 1776.14  |
| l. terme - A2  | 5.33      | 223.24   | 373.44   | 9.25      | 646.30   | 954.16   | l. terme - A2  | 8.33      | 77.59    | 386.16   | 14.21     | 189.78   | 1180.55  |

|  |  |
|--|--|
| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |
| <b>Modèle DARWin-ME</b>  | <b>Modèle DARWin-ME</b>  |
| <b>Mesure d'adaptation 7</b>   | <b>Mesure d'adaptation 7</b>   |
| <b>Durée de vie [an]</b>   | <b>Durée de vie [an]</b>   |
| <b>Sol S4 - Superstructure SS1</b>   | <b>Sol S2 - Superstructure SS2</b>   |

| T5             |           |          |          |           |          |          | T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   |           |          |          |           |          |          | Performances   |           |          |          |           |          |          |
| réf.1          | 27.27     | 34.45    | 426.78   | -         | -        | -        | réf.1          | 17.85     | 353.18   | 164.46   | 25.97     | -        | 308.26   |
| c. terme - B1  | 23.41     | 27.55    | 286.92   | -         | -        | -        | c. terme - B1  | 15.54     | 245.19   | 127.82   | 24.09     | -        | 268.78   |
| c. terme - A1B | 23.29     | 27.33    | 289.79   | -         | -        | -        | c. terme - A1B | 15.52     | 243.26   | 129.03   | 23.92     | -        | 249.99   |
| c. terme - A2  | 23.16     | 27.11    | 292.66   | -         | -        | -        | c. terme - A2  | 15.50     | 241.34   | 130.23   | 23.75     | -        | 231.19   |
| m. terme - B1  | 22.29     | 26.01    | 333.65   | -         | -        | -        | m. terme - B1  | 14.59     | 290.45   | 134.54   | 22.57     | -        | 217.66   |
| m. terme - A1B | 21.94     | 25.32    | 302.45   | -         | -        | -        | m. terme - A1B | 14.55     | 250.16   | 129.04   | 22.11     | -        | 208.06   |
| m. terme - A2  | 21.59     | 24.64    | 271.25   | -         | -        | -        | m. terme - A2  | 14.52     | 209.87   | 123.54   | 21.65     | -        | 198.45   |
| l. terme - B1  | 21.69     | 25.02    | 315.90   | -         | -        | -        | l. terme - B1  | 14.28     | 253.04   | 126.64   | 21.87     | -        | 239.23   |
| l. terme - A1B | 20.08     | 22.94    | 262.80   | -         | -        | -        | l. terme - A1B | 13.23     | 198.83   | 114.24   | 20.40     | -        | 211.61   |
| l. terme - A2  | 18.46     | 20.86    | 209.69   | -         | -        | -        | l. terme - A2  | 12.18     | 144.61   | 101.85   | 18.93     | 387.37   | 183.99   |

| T6             |           |          |          |           |          |          | T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Omniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 16.05     | 116.85   | 1601.22  | 24.33     | 279.22   | 13701.67 | réf.1          | 17.42     | -        | 966.06   | 25.93     | -        | 5908.60  |
| c. terme - B1  | 13.52     | 76.33    | 716.40   | 22.50     | 223.56   | 27160.76 | c. terme - B1  | 15.05     | -        | 455.87   | 23.92     | -        | 14345.51 |
| c. terme - A1B | 13.48     | 74.97    | 750.06   | 22.31     | 192.91   | 14253.64 | c. terme - A1B | 15.02     | -        | 501.38   | 23.69     | -        | 7676.02  |
| c. terme - A2  | 13.45     | 73.60    | 783.72   | 22.13     | 162.26   | 1346.52  | c. terme - A2  | 15.00     | -        | 546.90   | 23.46     | -        | 1006.53  |
| m. terme - B1  | 12.35     | 75.98    | 1114.99  | 20.82     | 148.40   | 1114.03  | m. terme - B1  | 13.90     | -        | 706.45   | 22.23     | -        | 806.19   |
| m. terme - A1B | 12.32     | 69.41    | 929.75   | 20.30     | 132.40   | 1064.93  | m. terme - A1B | 13.89     | -        | 590.03   | 21.68     | -        | 769.55   |
| m. terme - A2  | 12.30     | 62.84    | 744.51   | 19.79     | 116.40   | 1015.82  | m. terme - A2  | 13.88     | -        | 473.60   | 21.13     | -        | 732.92   |
| l. terme - B1  | 12.03     | 71.31    | 1065.90  | 20.13     | 165.24   | 4389.46  | l. terme - B1  | 13.68     | -        | 666.93   | 21.49     | -        | 2964.83  |
| l. terme - A1B | 11.06     | 59.38    | 771.67   | 18.41     | 133.68   | 2968.23  | l. terme - A1B | 12.69     | -        | 491.37   | 19.88     | -        | 2152.90  |
| l. terme - A2  | 10.09     | 47.45    | 477.44   | 16.69     | 102.13   | 1546.99  | l. terme - A2  | 11.70     | -        | 315.82   | 18.26     | -        | 1340.98  |



10.5.7.2. Analyse de risque

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 7**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "intermédiaire"**

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 22.8 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme | 33.3%           | 21.0 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Probable        | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Faible          |             | -           |             | -           |             |
| long-terme  | 66.7%           | 19.2 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très probable   | Moyenne     | -           | -           | -           | -           |
|             | Elevée          |             | -           |             | -           |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 66.7%         | 15.7 ans    | 66.7%         | 19.1 ans    | 33.3%         | 20.5 ans    |
|             | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Elevée        |             | Elevée        |             | Faible        |             |
| moyen-terme | 66.7%         | 14.2 ans    | 66.7%         | 17.3 ans    | 44.4%         | 18.7 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Moyenne       |             |
| long-terme  | 88.9%         | 12.7 ans    | 77.8%         | 15.6 ans    | 66.7%         | 16.9 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 7**  
**Analyse de risque - Catégorie de risque**  
**Région "chaude"**

| Trafic T5   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 14.4 ans    | 100.0%        | 18.5 ans    | 33.3%         | 20.7 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Probable      | Faible      |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Faible        |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 13.4 ans    | 100.0%        | 17.3 ans    | 66.7%         | 19.3 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |
| long-terme  | 100.0%        | 12.1 ans    | 100.0%        | 15.7 ans    | 77.8%         | 17.6 ans    |
|             | Très probable | Grave       | Très probable | Moyenne     | Très probable | Moyenne     |
|             | Très élevée   |             | Elevée        |             | Elevée        |             |

| Trafic T6   |               |             |               |             |               |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2        |             | Sol S3        |             | Sol S4        |             |
|             | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence | Probabilité   | Conséquence |
| court-terme | 100.0%        | 9.4 ans     | 100.0%        | 11.5 ans    | 100.0%        | 12.6 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| moyen-terme | 100.0%        | 8.5 ans     | 100.0%        | 10.4 ans    | 100.0%        | 11.5 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |
| long-terme  | 100.0%        | 7.7 ans     | 100.0%        | 9.5 ans     | 100.0%        | 10.3 ans    |
|             | Très probable | Très grave  | Très probable | Très grave  | Très probable | Grave       |
|             | Très élevée   |             | Très élevée   |             | Très élevée   |             |

**10.5.8. Mesure 8 : Adaptation du type de liant : Utilisation d'un bitume polymère PmB**

*10.5.8.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 8 – a*

|   |   |
|---|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   | <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 8 - a</i>  | <i>Mesure d'adaptation 8 - a</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  | <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S2 - Superstructure SS1</i>  | <i>Sol S3 - Superstructure SS1</i>  |

| T5                 |           |          |          |           |          |          | T5                 |           |          |          |           |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 14.78     | 109.87   | 327.90   | 21.84     | 220.20   | 637.92   | Performances réf.1 | 21.44     | 43.89    | 331.44   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 10.12     | 60.47    | 175.86   | 15.95     | 109.39   | 346.32   | l. terme - A2      | 14.84     | 25.85    | 176.22   | -         | -        | -        |

| T6                 |           |          |          |           |          |          | T6                 |           |          |          |           |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 8.17      | 493.03   | 894.85   | 13.18     | -        | 2748.39  | Performances réf.1 | 12.56     | 215.07   | 1043.13  | 19.96     | 411.69   | 5071.67  |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 5.17      | 218.67   | 362.21   | 9.08      | 531.26   | 944.49   | l. terme - A2      | 8.17      | 74.78    | 385.13   | 13.49     | 182.28   | 1137.69  |

|   |   |
|---|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   | <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 8 - a</i>  | <i>Mesure d'adaptation 8 - a</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  | <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S4 - Superstructure SS1</i>  | <i>Sol S2 - Superstructure SS2</i>  |

| T5                 |           |          |          |           |          |          | T5                 |           |          |          |           |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 25.97     | 31.37    | 415.99   | -         | -        | -        | Performances réf.1 | 16.82     | 355.45   | 159.86   | 24.23     | -        | 292.06   |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 17.87     | 19.88    | 206.98   | -         | -        | -        | l. terme - A2      | 11.48     | 139.31   | 99.58    | 17.92     | 349.45   | 179.88   |

| T6                 |           |          |          |           |          |          | T6                 |           |          |          |           |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario           | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |                    | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 15.05     | 105.50   | 1515.21  | 23.36     | 272.48   | 15621.89 | Performances réf.1 | 16.55     | -        | 969.40   | 24.44     | -        | 5484.28  |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 10.00     | 45.85    | 469.37   | 15.88     | 97.54    | 1490.96  | l. terme - A2      | 11.22     | -        | 309.21   | 17.50     | -        | 1300.17  |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario           | T5        |          |          | T6        |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 21.30     | 50.42    | 109.71   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 14.60     | 28.63    | 69.45    | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS2**

| Scénario           | T5        |          |          | T6        |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 22.03     | 35.89    | 45.87    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 15.17     | 16.58    | 26.38    | -         | -        | -        |

| Scénario           | T5        |          |          | T6        |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 17.73     | 405.64   | 447.42   | 26.60     | 687.09   | 1732.51  |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 11.92     | 105.81   | 188.10   | 18.67     | 330.89   | 507.47   |

| Scénario           | T5        |          |          | T6        |          |          |
|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances réf.1 | 18.03     | 224.63   | 165.67   | 26.35     | 432.43   | 487.33   |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2      | 12.04     | 86.51    | 66.15    | 18.66     | 199.98   | 161.67   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 16.16     | 104.63   | -        | 299.87 | 24.69     | 191.01   | -        | 299.14 |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2      | 10.21     | 47.97    | -        | 299.67 | 16.66     | 92.03    | -        | 299.02 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 18.64     | 589.33   | -        | 303.80 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 12.06     | 176.71   | -        | 301.91 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 6.25      | 26.17    | -        | 179.50 | 10.93     | 43.67    | -        | 179.11 |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2      | 4.08      | 14.38    | -        | 179.45 | 7.08      | 24.53    | -        | 179.12 |

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 8.08      | 61.24    | -        | 180.38 | 13.17     | 103.65   | -        | 180.44 |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2      | 5.00      | 28.87    | -        | 180.00 | 8.25      | 53.25    | -        | 179.92 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - a**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SSS**

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |     |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances réf.1 | 20.66     | -        | -        | 299.04 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2      | 13.49     | -        | -        | 296.71 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario           | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|--------------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| Performances réf.1 | 8.92      | 199.74   | -        | 179.67 | 14.27     | 331.63   | -        | 179.90 |
| c. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1      | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B     | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2      | 5.08      | 70.55    | -        | 178.39 | 9.17      | 148.53   | -        | 178.87 |

10.5.8.2. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 8 – b

|   |   |
|---|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   | <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 8 - b</i>  | <i>Mesure d'adaptation 8 - b</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  | <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S2 - Superstructure SS1</i>  | <i>Sol S3 - Superstructure SS1</i>  |

| T5             |           |          |          |           |          |          | T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.64     | 109.55   | 327.77   | 21.62     | 218.03   | 634.64   | réf.1          | 21.28     | 43.64    | 331.46   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.06     | 60.46    | 175.28   | 15.82     | 108.90   | 345.97   | l. terme - A2  | 14.78     | 25.79    | 176.27   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          | T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          | Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 8.17      | 490.92   | 887.65   | 13.00     | -        | 2673.20  | réf.1          | 12.43     | 212.13   | 1025.51  | 19.72     | 385.19   | 5351.57  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        | l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 5.17      | 218.67   | 365.59   | 9.00      | 525.59   | 949.75   | l. terme - A2  | 8.17      | 74.76    | 385.35   | 13.37     | 180.36   | 1129.35  |

|   |
|---|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b> |
| <i>Modèle DARWin-ME</i>   |
| <i>Mesure d'adaptation 8 - b</i>  |
| <i>Durée de vie [an]</i>  |
| <i>Sol S4 - Superstructure SS1</i>  |

| T5             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.78     | 31.17    | 414.18   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.82     | 19.83    | 207.10   | -         | -        | -        |

| T6             |           |          |          |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.92     | 105.40   | 1508.52  | 23.10     | 262.37   | 14299.62 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 9.92      | 45.82    | 470.91   | 15.75     | 97.23    | 1481.57  |



|  |  |
|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 8 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S2 - Superstructure S55 | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 8 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure S55 |
|--|--|

| Scénario       | T5       |          |          |        | T6       |          |          |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|
|                | 99100    |          | 99300    |        | 99100    |          | 99300    |        |
| Performances   | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 15.99    | 102.28   | -        | 299.88 | 24.39    | 182.75   | -        | 299.17 |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 10.13    | 47.74    | -        | 299.68 | 16.30    | 90.52    | -        | 299.08 |

| Scénario       | T5       |          |          |        | T6       |          |          |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|
|                | 99100    |          | 99300    |        | 99100    |          | 99300    |        |
| Performances   | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 6.25     | 25.58    | -        | 179.47 | 10.75    | 42.24    | -        | 179.09 |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 4.00     | 14.23    | -        | 179.45 | 7.00     | 24.05    | -        | 179.09 |

|  |
|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 8 - b<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure S55 |
|--|

| Scénario       | T5       |          |          |        | T6       |          |          |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|
|                | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 20.47    | -        | -        | 299.04 | 14.06    | 347.78   | -        | 179.90 |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 13.41    | -        | -        | 296.71 | 9.17     | 147.54   | -        | 178.88 |

| Scénario       | T5       |          |          |        | T6       |          |          |         |
|----------------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|---------|
|                | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM     |
| réf.1          | 8.33     | 194.64   | -        | 179.67 | 12.83    | 733.47   | -        | 1871.02 |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -      | -        | -        | -        | -       |
| l. terme - A2  | 5.17     | 70.57    | -        | 178.38 | 8.92     | 506.24   | -        | 825.75  |

10.5.8.3. Evaluation de la durée de vie des chaussées : Mesure 8 – c

|  |  |
|--|--|
| <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 8 - c<br>Durée de vie [an]<br>Sol S2 - Superstructure S51 | <b>Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses</b><br>Modèle DARWin-ME<br>Mesure d'adaptation 8 - c<br>Durée de vie [an]<br>Sol S3 - Superstructure S51 |
|--|--|

| Scénario       | T5       |          |          | T6       |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.50    | 98.46    | 276.84   | 21.38    | 185.61   | 506.27   |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.17    | 57.68    | 166.20   | 15.69    | 99.24    | 312.21   |

| Scénario       | T5       |          |          | T6       |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut | Omiéragé | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.15    | 39.50    | 290.75   | 19.61    | 385.60   | 2775.84  |
| c. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| c. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| m. terme - A2  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - B1  | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A1B | -        | -        | -        | -        | -        | -        |
| l. terme - A2  | 14.72    | 24.47    | 164.49   | 13.31    | 154.02   | 953.45   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS1**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 25.69     | 28.38    | 353.87   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 17.78     | 18.80    | 195.32   | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SS2**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 17.05     | 336.79   | 164.86   | 24.25     | -        | 293.97   |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.86     | 133.34   | 103.85   | 18.12     | 338.49   | 184.54   |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 14.88     | 89.66    | 1175.69  | 23.04     | 204.53   | 4491.25  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.00     | 42.54    | 454.44   | 15.72     | 83.86    | 1297.32  |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 15.94     | -        | 947.19   | 23.44     | -        | 5478.78  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 10.94     | -        | 307.20   | 16.90     | -        | 1225.56  |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS2**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 21.59     | 50.43    | 113.68   | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 15.07     | 28.41    | 73.14    | -         | -        | -        |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S4 - Superstructure SS2**

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 22.29     | 36.36    | 47.30    | -         | -        | -        |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 15.62     | 16.76    | 27.42    | -         | -        | -        |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 17.12     | 365.78   | 422.83   | 25.52     | 609.76   | 2775.84  |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.65     | 105.99   | 187.04   | 18.06     | 312.43   | 490.31   |

| Scénario       | T5        |          |          | T6        |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| réf.1          | 17.39     | 219.35   | 159.71   | 25.28     | 411.62   | 449.31   |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -         | -        | -        |
| l. terme - A2  | 11.76     | 87.00    | 65.61    | 18.06     | 193.70   | 157.21   |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S2 - Superstructure SS5**

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 15.99     | 104.61   | -        | 299.88 | 24.35     | 181.43   | -        | 299.18 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 10.16     | 51.12    | -        | 299.70 | 16.50     | 93.03    | -        | 299.08 |

**Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses**  
**Modèle DARWin-ME**  
**Mesure d'adaptation 8 - c**  
**Durée de vie [an]**  
**Sol S3 - Superstructure SS5**

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |     |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| réf.1          | 18.45     | 526.97   | -        | 303.62 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 12.01     | 204.00   | -        | 301.87 | -         | -        | -        | -   |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 6.25      | 25.82    | -        | 179.45 | 10.74     | 41.77    | -        | 179.10 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 4.00      | 14.81    | -        | 179.45 | 7.00      | 24.31    | -        | 179.09 |

| Scénario       | T5        |          |          |        | T6        |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 8.00      | 60.77    | -        | 180.51 | 12.96     | 99.48    | -        | 180.45 |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 4.92      | 30.18    | -        | 179.94 | 8.17      | 52.99    | -        | 179.85 |

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |           |          |          |        |           |          |          |        |
|--|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
| Modèle DARwin-ME   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| Mesure d'adaptation 8 - c  |           |          |          |        |           |          |          |        |
| Durée de vie [an]  |           |          |          |        |           |          |          |        |
| Sol S3 - Superstructure S55  |           |          |          |        |           |          |          |        |
| T5   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| Scénario   | 99100     |          |          | CSM    | 99300     |          |          | CSM    |
|  | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |        | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |        |
| Performances   | 20.47     | -        | -        | 298.95 | -         | -        | -        | -      |
| réf.1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 13.44     | -        | -        | 296.65 | -         | -        | -        | -      |
| T6   |           |          |          |        |           |          |          |        |
| Scénario   | 99100     |          |          | CSM    | 99300     |          |          | CSM    |
|  | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |        | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |        |
| Performances   | 8.33      | 199.06   | -        | 179.61 | 14.06     | 338.10   | -        | 179.75 |
| réf.1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| c. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| m. terme - A2  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - B1  | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A1B   | -         | -        | -        | -      | -         | -        | -        | -      |
| l. terme - A2  | 5.17      | 75.88    | -        | 178.35 | 9.17      | 153.63   | -        | 178.90 |

### 10.5.9. Mesure 9 : Adaptation de la superstructure : Utilisation d'un enrobé à module élevé (AC EME) et d'un enrobé macrorugueux (AC MR)

#### 10.5.9.1. Evaluation de la durée de vie des chaussées

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  | Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARwin-ME   |  |  |  | Modèle DARwin-ME   |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 9  |  |  |  | Mesure d'adaptation 9  |  |  |  |
| Durée de vie [an]  |  |  |  | Durée de vie [an]  |  |  |  |
| Sol S2 - Superstructure SS1  |  |  |  | Sol S3 - Superstructure SS1  |  |  |  |

| T5             |           |          |          |       |           |          | T5             |          |           |          |          |     |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-------|-----------|----------|----------------|----------|-----------|----------|----------|-----|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | CSM   | 99300     |          |                | Scénario | 99100     |          |          | CSM | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |       | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut       |          | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |     | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   | 35.26     | 453.57   | -        | 37.72 | 419.83    | -        | Performances   | 49.42    | 166.89    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| réf.1          | 35.39     | 488.99   | -        | 37.58 | 445.61    | -        | réf.1          | 49.39    | 175.55    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| c. terme - B1  | 35.52     | 494.34   | -        | 37.70 | 442.89    | -        | c. terme - B1  | 49.07    | 182.10    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| c. terme - A1B | 35.65     | 499.68   | -        | 37.82 | 440.17    | -        | c. terme - A1B | 48.75    | 188.66    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| c. terme - A2  | 35.61     | 519.00   | -        | 37.76 | 456.39    | -        | c. terme - A2  | 48.85    | 189.00    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| m. terme - B1  | 35.81     | 532.67   | -        | 37.94 | 460.04    | -        | m. terme - B1  | 49.14    | 187.27    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| m. terme - A1B | 36.01     | 546.35   | -        | 38.13 | 463.69    | -        | m. terme - A1B | 49.42    | 185.55    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| m. terme - A2  | 35.75     | 514.36   | -        | 37.75 | 475.27    | -        | m. terme - A2  | 48.95    | 189.30    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| l. terme - B1  | 35.97     | 496.89   | -        | 37.92 | 524.36    | -        | l. terme - B1  | 49.19    | 189.07    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| l. terme - A1B | 36.20     | 479.41   | -        | 38.10 | 573.45    | -        | l. terme - A1B | 49.43    | 188.83    | -        | -        | -   | -         | -        |          |
| l. terme - A2  |           |          |          |       |           |          | l. terme - A2  |          |           |          |          |     |           |          |          |

| T6             |           |          |          |       |           |          | T6             |          |           |          |          |        |           |          |          |
|----------------|-----------|----------|----------|-------|-----------|----------|----------------|----------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|
| Scénario       | 99100     |          |          | CSM   | 99300     |          |                | Scénario | 99100     |          |          | CSM    | 99300     |          |          |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |       | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut       |          | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |        | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut |
| Performances   | 23.15     | -        | -        | 25.66 | -         | -        | Performances   | 31.75    | 519.24    | -        | 35.26    | 504.40 | -         |          |          |
| réf.1          | 22.88     | -        | -        | 25.33 | -         | -        | réf.1          | 31.51    | 516.19    | -        | 34.69    | 513.81 | -         |          |          |
| c. terme - B1  | 22.88     | -        | -        | 25.38 | -         | -        | c. terme - B1  | 31.46    | 530.40    | -        | 34.75    | 509.08 | -         |          |          |
| c. terme - A1B | 22.87     | -        | -        | 25.43 | -         | -        | c. terme - A1B | 31.41    | 544.61    | -        | 34.81    | 504.35 | -         |          |          |
| c. terme - A2  | 22.72     | -        | -        | 25.34 | -         | -        | c. terme - A2  | 31.34    | 556.72    | -        | 34.62    | 530.64 | -         |          |          |
| m. terme - B1  | 22.91     | -        | -        | 25.27 | -         | -        | m. terme - B1  | 31.42    | 548.59    | -        | 34.48    | 518.05 | -         |          |          |
| m. terme - A1B | 23.10     | -        | -        | 25.20 | -         | -        | m. terme - A1B | 31.49    | 540.47    | -        | 34.33    | 505.45 | -         |          |          |
| m. terme - A2  | 22.91     | -        | -        | 25.18 | -         | -        | m. terme - A2  | 31.35    | 572.60    | -        | 34.56    | 509.63 | -         |          |          |
| l. terme - B1  | 22.94     | -        | -        | 25.10 | -         | -        | l. terme - B1  | 31.25    | 556.53    | -        | 34.33    | 525.01 | -         |          |          |
| l. terme - A1B | 22.98     | -        | -        | 25.02 | -         | -        | l. terme - A1B | 31.15    | 540.47    | -        | 34.10    | 540.38 | -         |          |          |
| l. terme - A2  |           |          |          |       |           |          | l. terme - A2  |          |           |          |          |        |           |          |          |



| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |           |          |          |        |           |          |          |     |
|--|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|-----|
| Modèle DARWin-ME   |           |          |          |        |           |          |          |     |
| Mesure d'adaptation 9  |           |          |          |        |           |          |          |     |
| Durée de vie [an]  |           |          |          |        |           |          |          |     |
| Sol S3 - Superstructure S35  |           |          |          |        |           |          |          |     |
| T5   |           |          |          |        |           |          |          |     |
| Scénario   | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |     |
|  | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM |
| Performances   |           |          |          |        |           |          |          |     |
| réf.1  | 54.52     | -        | -        | 304.24 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - B1  | 53.56     | -        | -        | 303.89 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A1B   | 53.49     | -        | -        | 303.66 | -         | -        | -        | -   |
| c. terme - A2  | 53.43     | -        | -        | 303.42 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - B1  | 53.35     | -        | -        | 303.49 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A1B   | 53.34     | -        | -        | 303.06 | -         | -        | -        | -   |
| m. terme - A2  | 53.33     | -        | -        | 302.63 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - B1  | 53.15     | -        | -        | 303.44 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A1B   | 52.87     | -        | -        | 302.63 | -         | -        | -        | -   |
| l. terme - A2  | 52.60     | -        | -        | 301.83 | -         | -        | -        | -   |

| T6             |           |          |          |        |           |          |          |        |
|----------------|-----------|----------|----------|--------|-----------|----------|----------|--------|
| Scénario       | 99100     |          |          |        | 99300     |          |          |        |
|                | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    | Orniérage | Haut-Bas | Bas-Haut | CSM    |
| réf.1          | 31.33     | -        | -        | 182.04 | 35.38     | -        | -        | 182.27 |
| c. terme - B1  | 30.62     | -        | -        | 181.73 | 34.26     | -        | -        | 182.02 |
| c. terme - A1B | 30.60     | -        | -        | 181.66 | 34.27     | -        | -        | 181.93 |
| c. terme - A2  | 30.58     | -        | -        | 181.60 | 34.29     | -        | -        | 181.84 |
| m. terme - B1  | 30.39     | -        | -        | 181.62 | 34.10     | -        | -        | 181.81 |
| m. terme - A1B | 30.36     | -        | -        | 181.42 | 33.86     | -        | -        | 181.63 |
| m. terme - A2  | 30.32     | -        | -        | 181.23 | 33.62     | -        | -        | 181.44 |
| l. terme - B1  | 30.26     | -        | -        | 181.60 | 33.78     | -        | -        | 181.74 |
| l. terme - A1B | 29.99     | -        | -        | 181.13 | 33.29     | -        | -        | 181.47 |
| l. terme - A2  | 29.71     | -        | -        | 180.67 | 32.79     | -        | -        | 181.20 |

10.5.9.2. Analyse de risque

| Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Modèle DARWin-ME   |  |  |  |  |  |  |
| Mesure d'adaptation 9  |  |  |  |  |  |  |
| Analyse de risque - Catégorie de risque                                    |  |  |  |  |  |  |
| Région "intermédiaire"   |  |  |  |  |  |  |

| Trafic T5   |                 |             |             |             |             |             |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3      |             | Sol S4      |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité | Conséquence | Probabilité | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 44.7 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 44.6 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |
| long-terme  | 0.0%            | 44.3 ans    | -           | -           | -           | -           |
|             | Très improbable | Faible      | -           | -           | -           | -           |
|             | Très faible     |             | -           |             | -           |             |

| Trafic T6   |                 |             |                 |             |                 |             |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 31.5 ans    | 0.0%            | 37.2 ans    | 0.0%            | 39.3 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 31.3 ans    | 0.0%            | 36.9 ans    | 0.0%            | 39.0 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |
| long-terme  | 0.0%            | 30.9 ans    | 0.0%            | 36.6 ans    | 0.0%            | 38.5 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très faible     |             | Très faible     |             | Très faible     |             |

## Impact du changement climatique sur les performances des chaussées Suisses

Modèle DARWin-ME

Mesure d'adaptation 9

Analyse de risque - Catégorie de risque

Région "chaude"

| Trafic T5   |                 |             |                 |             |                 |             |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 41.3 ans    | 0.0%            | 45.6 ans    | 0.0%            | 52.4 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Elevée          |             | Elevée          |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 41.3 ans    | 0.0%            | 44.7 ans    | 0.0%            | 51.0 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Elevée          |             | Elevée          |             |
| long-terme  | 0.0%            | 41.3 ans    | 0.0%            | 43.4 ans    | 0.0%            | 49.1 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Très élevée     |             | Elevée          |             |

| Trafic T6   |                 |             |                 |             |                 |             |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Scénario    | Sol S2          |             | Sol S3          |             | Sol S4          |             |
|             | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence | Probabilité     | Conséquence |
| court-terme | 0.0%            | 28.4 ans    | 0.0%            | 33.6 ans    | 0.0%            | 35.5 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Très élevée     |             | Très élevée     |             |
| moyen-terme | 0.0%            | 28.3 ans    | 0.0%            | 33.5 ans    | 0.0%            | 35.4 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Très élevée     |             | Très élevée     |             |
| long-terme  | 0.0%            | 28.2 ans    | 0.0%            | 33.2 ans    | 0.0%            | 35.1 ans    |
|             | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      | Très improbable | Faible      |
|             | Très élevée     |             | Très élevée     |             | Très élevée     |             |

## 11. CURRICULUM VITAE

Patrick RYCHEN

### Données personnelles

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Adresse</b>           | Laboratoire des voies de circulation<br>EPFL - ENAC - IIC - LAVOC<br>Station 18<br>CH-1015 Lausanne |
| <b>Téléphone</b>         | +41 (0)21 693 08 93<br>+41 (0)76 573 75 45  |
| <b>E-mail</b>            | patrick.rychen@epfl.ch  |
| <b>Date de naissance</b> | 29.05.1981  |
| <b>Nationalité</b>       | Suisse  |
| <b>Etat civil</b>        | Célibataire   |



### Activités professionnelles principales

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>Depuis 2008</b> | Assistant-Doctorant au Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) sous la supervision du Prof. A.-G. Dumont<br>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) |
| <b>2007-2008</b>   | Assistant au Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)<br>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)   |

### Domaines de compétences professionnelles

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Infrastructures routières</b> | Dimensionnement et renforcement<br>Instrumentation et suivi sections routières et essais en vraie grandeur<br>Maintenance hivernale  |
| <b>Matériaux</b>                 | Formulation des enrobés<br>Comportement mécanique des enrobés<br>Essais en laboratoire<br>Enrobés drainants<br>Enrobés peu bruyants (phonoabsorbants)  |
| <b>Conception routière</b>       | Conception tracés routiers<br>Evaluation bruit routier   |
| <b>Enseignement</b>              | Assistanat et participation à l'enseignement des cours du prof. A.-G. Dumont :<br>– Réalisation des infrastructures de transport, cours Master, Génie Civil (2007-2010)<br>– Voies de circulation, cours Master, Génie Civil (2011-2012)<br>– Conception des voies de circulation, cours Bachelor, Génie Civil (2007-2010)<br>– Conception des infrastructures de transport, cours Bachelor, Génie Civil (2011-2012) |

- Gestion de la maintenance des infrastructures, cours Master, Génie Civil (2009-2011)
- Aménagements et équipements du territoire, cours Master, Sciences et Ingénierie de l'Environnement (2007-2011)
- Projets de semestre et projets de Master, Génie Civil, (2007-2012)

## Activités professionnelles secondaires

- Depuis 2012** Expert à l'Association Suisse des Professionnels de la route (VSS) – Commission 5.03 : Dimensionnement
- Depuis 2011** Membre de la Arbeitsgruppe "Naturgefahren und Klimaänderung"
- Depuis 2008** Représentant dans le projet COST TU0702 "Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions"

## Formation professionnelle complémentaire

- Avril 2009** Short Term Scientific Mission (STSM) à la Technische Universität Wien dans le cadre du projet COST TU0702

## Formation supérieure

- 2007** Projet de Master : Réaménagement du réseau autoroutier de l'ouest lausannois  
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) ; Prof. A.-G. Dumont
- 2005 – 2007** Master of Science, Spécialisation « Transport et Mobilité »  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Section de Génie Civil
- 2001 – 2005** Bachelor of Science  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Section de Génie Civil
- 1999 – 2001** Certificat de Maturité scientifique  
Gymnase CESSEV de Burier VD
- 1996 – 1999** Kantonsschule Schaffhausen

## Projets de recherche et publications

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Evaluating climate change impact on rutting resistance of asphalt pavements*, Road Materials and Pavement Design, article soumis.

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Evaluating climate change impact on rutting resistance of asphalt pavements*, 5<sup>th</sup> European Asphalt Technology Association (EATA) Conference, Braunschweig, 2013, papier soumis.

RYCHEN P., *Impact du changement climatique sur les chaussées Suisses*, Strasse und Verkehr – Route et trafic, article soumis.

RYCHEN P., PITTET M., DUMONT A.-G., *Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités – EP1: Formulation des revêtements peu bruyants*, Projet OFROU n°2010/010, 2013.

*Formulation et comportement des enrobés de surface macrorugueux*, Projet VSS n°2009/502, 2013.

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée – Analyse des performances pour le cas du changement de températures*, Projet OFROU n°2009/004, 2013.

RYCHEN P., CARTER A., DUMONT A.-G., *Methodology for evaluating climate change impact on asphalt pavement design life*, Journal of the Transportation Research Board, article soumis.

RYCHEN P., CARTER A., DUMONT A.-G., *Methodology for evaluating climate change impact on asphalt pavement design life*, Transportation Research Board – 92<sup>nd</sup> Annual Meeting, Washington D.C., 2013.



EL FAOUZI N.-E., RYCHEN P. et al., *COST TU0702 - Real-time Monitoring, Surveillance and Control of Road Networks under Adverse Weather Conditions: Part I - Effects of weather on Traffic and Pavement: State of the Art and Best Practices*, Rapport COST, 2011.

RYCHEN P., *Température des enrobés in situ et en laboratoire - Refroidissement des enrobés en halle fosse et in situ*, Journée Technique LAVOC, Lausanne, 2010.

RYCHEN P., PITTET M., DUMONT A.-G., *Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux*, Rapport OFROU n°1293, 2010.

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Jetbroom - Suivi de l'essai grandeur nature*, Rapport LAVOC n°75170, 2009.

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Jetbroom - Grossversuch*, Rapport LAVOC n°31000, 2009.

BUECHE N., RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Optical fiber feasibility study in Accelerated Pavement Testing facility*, The sixth international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control (MAIREPAV), Torino, 2009.

RYCHEN P., *Applicabilité des enrobés drainants sur les ouvrages d'art*, Journée Technique LAVOC, Lausanne, 2009.

RODRIGUEZ M., RYCHEN P., *Données thermo-physiques des revêtements - Autoroute du Rhône A9 à Ardon*, Rapport LAVOC n°3080, 2008.

BUECHE N., CHUNG E., LAVRIC I., RYCHEN P., BENBOW E., WRIGHT A., *INTRO-Intelligent Roads. Use of Combined Probe Vehicle and In Situ Measurements, Proposals for Best Practice Implementation*, Rapport de recherche INTRO (FEHRL) no.012344, Deliverable 3.3, 2008.

RODRIGUEZ M., RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales*, Rapport OFROU n°635, 2008.

RYCHEN P., *Réaménagement du réseau autoroutier de l'ouest lausannois*, *Strasse und Verkehr – Route et trafic*, n°5, 2008, p. 28-31.

RYCHEN P., DUMONT A.-G., *Réaménagement du réseau autoroutier de l'ouest lausannois*, Projet de Master, Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), 2007.

## Connaissances et compétences

|                     |   |                                |
|---------------------|---|--------------------------------|
| <b>Langues</b>      | Français & Allemand – bilingue  | Anglais – bonnes connaissances |
| <b>Informatique</b> | Général : MS Office, iGrafix Designer, Java, MATLAB<br>Génie Civil : AutoCAD, DARWin-ME, PradoWin, NOAH, ALIZE-LCPC, Mensura Genius, GeoMacao, AIMSUN |                                |
| <b>Hobbies</b>      | Sport (Handball, Badminton, Vélo, Ski), voyages, lecture  |                                |