

# IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES CHAUSSÉES DES RÉSEAUX ROUTIERS QUÉBÉCOIS

Par  
Guy Doré, ing., Ph.D.  
Jean-Pascal Bilodeau, ing., Ph.D.  
Papa Masseck Thiam, ing. jr.  
François Perron Drolet

Département de génie civil et de génie des eaux  
Université Laval

Juin 2014

*Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas  
Ouranos ni ses membres.*



## Table des matières

1	Introduction .....	4
2	Objectifs.....	5
3	Cadre théorique / Compte-rendu de la littérature .....	5
3.1	Éléments en lien avec les changements et les projections climatiques.....	5
3.2	Éléments en lien avec le comportement des matériaux et des chaussées .....	7
3.3	Synthèse .....	9
4	Méthodologie et données.....	10
5	Résultats.....	11
5.1	Effet de l'augmentation des précipitations sur la performance des chaussées flexibles.....	11
5.1.1	Relation entre la teneur en eau des sols d'infrastructure de chaussées et les précipitations .....	14
5.1.2	Effet du degré de saturation sur le module réversible et la résistance à la déformation permanente des sols	16
5.1.3	Scénarios climatiques pour l'augmentation des précipitations .....	21
5.1.4	Effet des variations des précipitations sur l'endommagement et la performance à long terme des chaussées flexibles.....	25
5.2	Effet de l'augmentation des températures hivernales sur la performance des chaussées flexibles .....	30
5.2.1	Simulations climatiques pour la période hivernale au Québec et traitement des données climatiques	31
5.2.2	Méthodologie de correction pour les indices de gel de l'air et quantification des effets positifs.....	38
5.2.3	Effet du nombre de redoux hivernaux sur la durée de vie des chaussées et quantification des effets négatifs	46
6	Analyse et discussion .....	58
7	Conclusion .....	60
8	Bibliographie .....	62

# 1 Introduction

---

Les réseaux routiers provinciaux et municipaux constituent une infrastructure civile majeure dont la performance à long terme est fortement influencée par le climat et les conditions météorologiques. Selon un rapport de la commission royale sur le transport des personnes (1992), ces facteurs sont responsables de la plus grande partie des dommages subis par les chaussées au Canada. La proportion des dommages attribuable à ces facteurs atteint 50% pour les routes à fort volume de circulation et jusqu'à 80% pour les routes à faible débit (Doré et al. 2006). Les auteurs attribuent une bonne partie des détériorations prématurées aux effets des cycles de gel-dégel. Bien que ce rapport ne soit pas très récent et malgré le fait que les chiffres puissent varier d'un auteur à l'autre, l'importance des conditions climatiques et météorologiques dans la détérioration des chaussées au Canada est largement reconnue par les experts du domaine. Par ailleurs, le consensus est maintenant acquis au sein de la communauté scientifique : nous vivons d'importants changements climatiques. Ces changements se manifestent de plusieurs façons dont les plus documentées sont l'augmentation généralisée des températures et le changement du régime des précipitations. Pour les infrastructures de transport situées dans des régions affectées par le gel saisonnier, les conséquences anticipées sont les suivantes (Houghton et al. 2001; Mills and Andrey 2002; Chaumont et Brown 2010):

- 1) l'augmentation des épisodes de chaleur intense en été, ce qui entraînera l'augmentation des dommages par déformation permanente des revêtements bitumineux,
- 2) en plus d'accroître le ruissellement en surface, l'augmentation d'intenses épisodes de précipitation susceptibles d'augmenter les niveaux de saturation dans les sols et les matériaux de chaussées,
- 3) l'augmentation des cycles de gel et dégel durant l'hiver et au début du printemps ce qui augmentera les dommages par fatigue des revêtements.

Par ailleurs, des conditions plus humides durant l'hiver, avec utilisation accrue de sels de déglacage, sont anticipées ce qui est également susceptible d'accroître la détérioration de l'uni des surfaces de chaussées par soulèvement différentiel au gel.

La sensibilité des chaussées aux conditions climatiques et météorologiques les rend vulnérables aux changements anticipés. À l'échelle du réseau provincial ou de réseaux municipaux, les effets des changements climatiques peuvent se traduire par une augmentation considérable des coûts d'entretien et des coûts encourus par les usagers de la route. Une des rares études faites à ce sujet compare le comportement du réseau australien soumis au climat prévalant en 2000 au comportement du même réseau s'il était soumis au climat projeté en 2100. L'étude conclut que les effets climatiques auraient pour effet de doubler les frais d'exploitation des véhicules (coûts à l'utilisateur pour les réparations, etc.) et d'augmenter de 30% les coûts d'entretien du réseau (Carrera et coll., 2009).

C'est dans le contexte d'un climat en évolution que d'importantes questions sur la performance des chaussées à long terme sont soulevées. Le projet a donc été entamé dans l'optique de bien comprendre comment les changements climatiques sont susceptibles d'affecter la performance des chaussées flexibles, mais aussi de quantifier leurs effets sur ces infrastructures, dont la valeur atteint plusieurs milliards de dollars pour la société canadienne. Étant donné l'expertise du groupe de recherche, les activités du projet ont donc été centrées sur l'effet de l'augmentation des précipitations, plus particulièrement en période hors gel et sur l'augmentation possible du nombre de cycles de gel et dégel en contexte d'augmentation des températures hivernales. Par ailleurs, en ce qui concerne l'effet des épisodes de chaleur intenses sur les revêtements bitumineux, étant donné le cycle de vie relativement court de ces matériaux, la sélection de bons matériaux au moment de la construction et des épisodes de réhabilitation est susceptible de contrer de façon assez efficace cette problématique. Cependant, les effets de l'augmentation des précipitations et du nombre de cycles de gel et dégel font intervenir le comportement des couches plus profondes, pour lesquelles des interventions sont beaucoup plus coûteuses et demandent une logistique plus importante. Il a donc été décidé que ces aspects sont particulièrement critiques en contexte de changements climatiques et d'importants efforts ont été investis dans ce projet sur l'étude de ces deux aspects

pour quantifier l'impact, à l'aide de lois et de modèles adaptés, de l'évolution du climat sur les infrastructures routières.

## **2 Objectifs**

---

Le but du projet est de développer une expertise ainsi que de fournir des données techniques pour faciliter l'adaptation des infrastructures de transport face au défi important que représentent les changements climatiques. Plus spécifiquement, le projet vise les objectifs suivants :

- Comprendre les mécanismes d'affaiblissement lorsque les niveaux de saturation des sols sont élevés et lors d'épisodes de dégel partiels répétés de la chaussée et en établir les effets sur la détérioration des chaussées (fissuration, orniérage, etc.)
- Établir la conséquence de ces phénomènes sur la condition des réseaux routiers du sud québécois, considérant une gamme de scénarios réalistes de changement climatique établi à partir de publications récentes et spécifiques à la région considérée et à partir des simulations climatiques et de l'expertise disponible chez OURANOS
- Proposer des solutions pratiques pour la mitigation des effets anticipés et l'adaptation des réseaux routiers aux changements climatiques anticipés.

## **3 Cadre théorique / Compte-rendu de la littérature**

---

### ***3.1 Éléments en lien avec les changements et les projections climatiques***

---

L'ère industrielle a marqué le commencement de la consommation d'énergies fossiles comme le charbon et le pétrole. Cette époque est considérée comme le point de départ de l'intervention de l'homme sur l'atmosphère. Les principaux gaz à effet de serre (GES) émis sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O). Bien qu'il soit possible de les retrouver dans l'atmosphère à l'état naturel, les émissions d'origine anthropique ont clairement accentué l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère. La concentration en CO<sub>2</sub> est passée de 280 ppm à l'époque préindustrielle, à près de 380 ppm en 2005 (GIEC, 2007). De plus, le taux d'émission annuel a accéléré de 1,4 à 1,9 ppm/an au cours des dernières décennies (GIEC, 2007). La Figure 1 (GIEC, 2007) montre les concentrations des principaux GES au cours des deux derniers millénaires. Les rapports réalisés par le groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC) ont clairement démontré que la problématique des changements climatiques est attribuable aux activités humaines.

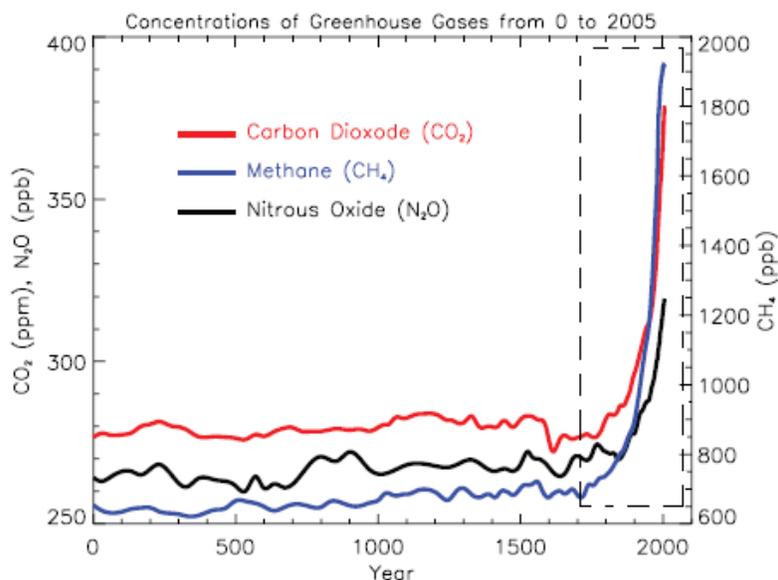


Figure 1: Évolution des émissions mondiales de principaux GES

Selon les projections émises par le 4e rapport du GIEC (2007), le sud du Québec devrait subir un réchauffement hivernal et une diminution de la couverture de neige. La réduction de la couverture de neige sera caractérisée par une diminution de sa durée et de sa hauteur. Une augmentation potentielle du nombre d'épisodes de redoux et de précipitations hivernales est appréhendée (Chaumont et Brown, 2010). Il est important de noter que les *Modèles de Climats Globaux* (MCGs) sont difficilement applicables pour une région telle que celle du sud du Québec. Certains indices climatiques subissent d'importants gradients spatiaux au cœur même de cette région.

À l'horizon 2050, durant la saison hivernale, la hausse des températures prévues est de 2,5 °C à 3,8 °C. De même, à la même période au printemps, cette hausse serait de 1,9 °C à 3,0 °C (DesJarlais et al., 2010). En ce qui concerne les précipitations, la hausse prévue en hiver pour l'horizon 2050 est de 8,6 % à 18,1 %. Comme il a été mentionné précédemment, l'accumulation de neige risque de diminuer au centre et au sud du Québec en raison du raccourcissement de la saison froide. Le Tableau 1 (DesJarlais et al. 2010) résume les prévisions pour la partie sud du Québec par rapport au climat de 1961-1990.

Tableau 1. Changements saisonniers de température et précipitation pour le sud du Québec à l'horizon 2020, 2050 et 2080.

Saison		Changement à l'horizon 2020	Changement à l'horizon 2050	Changement à l'horizon 2080
Hiver	Température	1,3 à 2,3 °C	2,5 à 3,8 °C	3,6 à 5,7 °C
	Précipitation	3,7 à 11,1 %	8,6 à 18,1 %	14,5 à 27,6 %
Printemps	Température	1,0 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,7 à 4,3 °C
	Précipitation	2,0 à 8,6 %	4,4 à 13,1 %	8,9 à 22,2 %
Été	Température	1,1 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,6 à 4,4 °C
	Précipitation	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4 %	-4,9 à 6,0 %
Automne	Température	1,2 à 1,9 °C	2,0 à 3,1 °C	2,7 à 4,5 °C
	Précipitation	-2,7 à 3,6 %	-0,7 à 7,7 %	0,4 à 12,8 %

En analysant les données de ce tableau, une tendance peut être ressortie. Lorsqu'il y a un changement de température ou de précipitation, celui-ci, ainsi que son incertitude, tend à s'accroître avec le temps. Cependant, si le changement est minime dès le premier horizon, la tendance n'augmenterait pas beaucoup à long terme.

Le Consortium Ouranos a produit un ensemble de projections climatiques pour le Canada (*Modèle Régional Canadien du Climat* MRCC) de plus grande résolution, permettant une analyse détaillée des indices climatiques (Chaumont et Brown, 2010). Il s'agit d'une série de simulations régionales (à 45 km de résolution) permettant de représenter le climat à l'horizon de 2050 selon différents facteurs. Les résultats obtenus prédisent des températures moyennes hivernales au sud du Québec de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durant l'été, la température moyenne pour le sud serait de  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pour ce qui est des précipitations, l'accumulation moyenne en été serait de 450 mm dans les régions les plus humides au sud. Durant l'hiver, le sud recueillerait 380 mm. La Figure 2 (DesJarlais et al. 2008) présente les projections climatiques (température moyenne et précipitation) pour l'horizon 2041-2070.

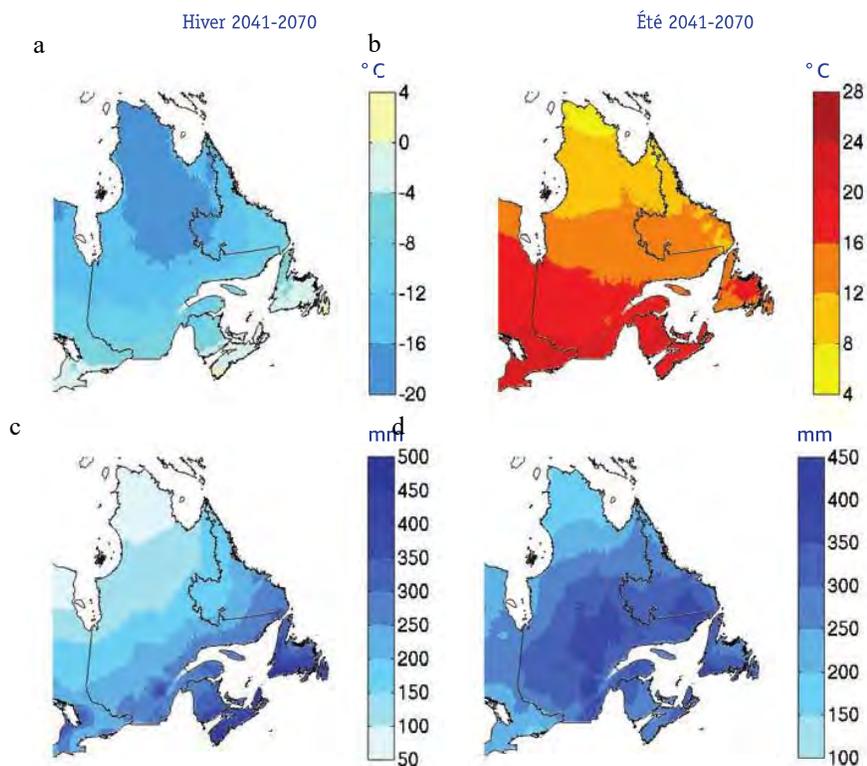


Figure 2: Moyenne des températures (a et b) et des précipitations (c et d) au Québec prévue pour 2041-2070

Dans l'étude de Chaumont et Brown (2010), différents scénarios climatiques pour l'horizon 2041-2070 ont également été effectués. Cette étude conclut que le climat hivernal de cet horizon serait plus chaud et humide. Le commencement de la période de gel serait plus tardif tandis que la période de dégel débiterait plus tôt. En moyenne, la période de gel serait réduite de 24 jours. Le nombre de précipitations sous forme de pluie augmenterait et une diminution de précipitation sous forme de neige du fait de la température moyenne plus haute et du nombre de redoux hivernaux. Les quantités de neige et de pluie accumulées lors des précipitations seront plus élevées, soit une augmentation de 10 % et de 20 % pour les quantités de neiges et de pluies respectivement.

### 3.2 Éléments en lien avec le comportement des matériaux et des chaussées

Les structures de chaussées flexibles et leurs matériaux sont influencés par les températures et le niveau d'humidité. La température influence de façon significative le comportement des sols et des matériaux granulaires seulement si leur température passe d'une valeur positive à une valeur négative. Ceci est principalement dû au fait que l'eau contenue dans les pores des matériaux non liés lie fortement les particules entre elles lorsque celle-ci passe de la phase liquide à la phase solide. Par contre, le gel de l'eau dans les pores d'un sol ainsi que la formation de lentille de glace due à la cryosuccion, tendent à dégrader les conditions de surface en hiver, à créer de la fissuration, à décompacter les matériaux de chaussées, et affectent le comportement lors du dégel (Doré 2004; Doré et Zubeck 2009). Cependant, les enrobés bitumineux sont des matériaux contenant un liant visqueux qui confère un comportement viscoélastique au matériau. Ainsi, ils sont influencés par la température et la vitesse de sollicitation. Ainsi, la variation de leurs propriétés mécaniques suit environ l'évolution sinusoïdale des températures. Les enrobés bitumineux sont aussi susceptibles de fissurer en hiver dû aux contraintes thermiques qui se développent dans le matériau à basse température. La Figure 3 présente l'évolution des propriétés des matériaux de chaussées en fonction des conditions saisonnières. Les sols et les matériaux granulaires subissent généralement une diminution assez importante de leurs propriétés mécaniques, pour les récupérer progressivement par la suite, dû à l'important apport d'eau dans les structures de chaussées lors de la fonte de la neige et de la glace au printemps. Tel que présenté à la Figure 4, le comportement sous charge, décrit par le module réversible  $M_r$  (rigidité) et la résistance à la déformation permanente  $\epsilon_p$  (endommagement par orniérage), est significativement influencé par le degré de saturation  $S_r$ . Plus le degré de saturation est élevé, plus les propriétés mécaniques des matériaux de chaussées tendent à diminuer.

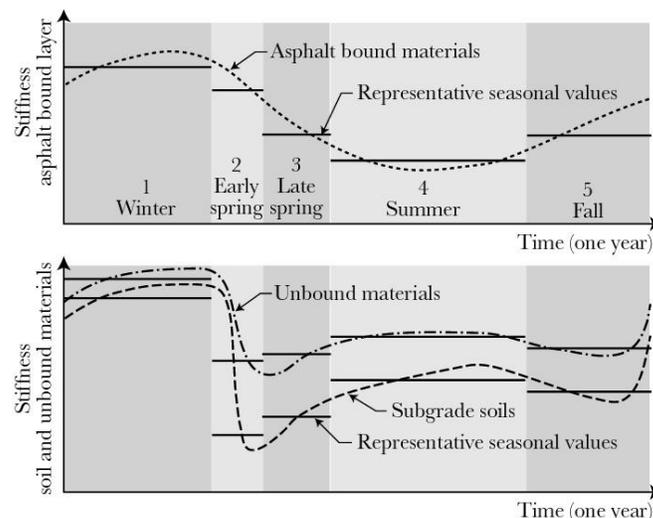


Figure 3. Variation saisonnière des propriétés des matériaux de chaussées (Doré et Zubeck 2009)

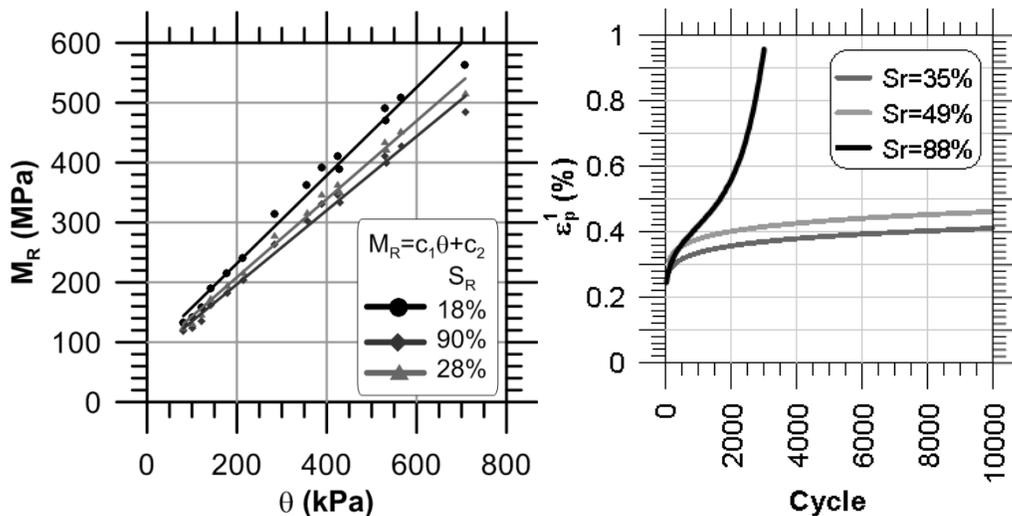


Figure 4. Effet de la saturation sur le module réversible (gauche) et sur la déformation permanente (droite)

Cette influence de la teneur en eau a une incidence majeure sur la performance des chaussées. Notamment, tel que présenté à la Figure 5, l'augmentation de la teneur en eau dans les fondations de chaussées a un effet marqué sur le comportement (déformation) de cette couche. L'augmentation des déformations témoigne d'un affaiblissement significatif de cette couche structurale. Typiquement, l'augmentation drastique de la saturation dans les couches supérieures de chaussées se produit lors de la fonte printanière ou lors des redoux hivernaux. De la même façon, des recherches ont montré que la profondeur de la nappe phréatique a un impact important sur la performance à long terme des structures de chaussées flexibles (Korkiala-Tantuu et Dawson 2007). Une hauteur de nappe phréatique plus élevée étant associée à une diminution de la durée de vie dû à l'affaiblissement des couches structurales dans la portion inférieure de la chaussée. Ce type de conditions est associé à un plus grand dommage en déformation permanente (orniérage).

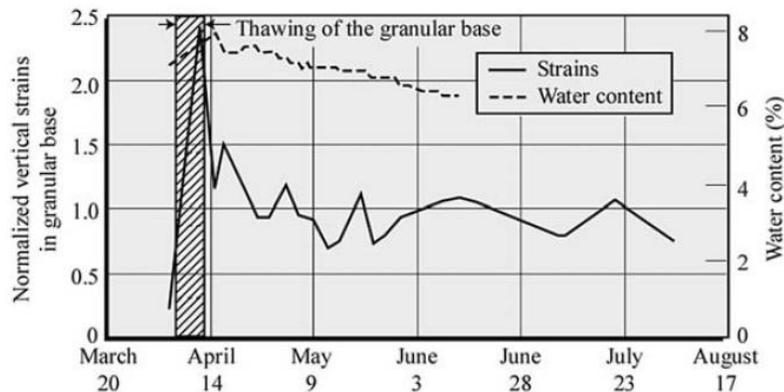


Figure 5. Affaiblissement d'une chaussée lors de l'augmentation de la teneur en eau au dégel dans les fondations (Doré et Zubeck 2009)

### 3.3 Synthèse

La mise en commun de l'information sur les effets attendus des changements climatiques et des principales conséquences climatiques sur la performance des chaussées est présentée au Tableau 2. Il est possible de constater

que, en ce qui concerne les chaussées flexibles et les principaux facteurs affectant leur performance, la diminution des températures hivernales aura un effet bénéfique du point de vue de la profondeur de gel. En effet, une diminution de la profondeur de gel est susceptible de diminuer les dommages associés au soulèvement au gel des sols d'infrastructure. Il s'agit d'un effet positif. Cependant, l'adoucissement des hivers est susceptible d'être associé à une augmentation du nombre de redoux hivernaux. Ces derniers provoquent des situations similaires à celles rencontrées au début du printemps et affaiblissent significativement la portion supérieure de la structure de chaussée. D'importants dommages associés à la charge peuvent donc survenir (orniérage et fissuration de fatigue). Du côté des saisons hors gel, l'augmentation des précipitations est susceptible d'augmenter l'apport en humidité dans les sols par divers mécanismes et de provoquer l'augmentation des nappes phréatiques. Or, la performance des sols et des matériaux de chaussées étant fortement fonction de leur teneur en eau, il est anticipé qu'une augmentation du régime des précipitations aura un effet négatif sur l'évolution de la condition des chaussées à long terme.

**Tableau 2. Synthèse de certains effets des changements climatiques sur les chaussées (Thiam 2014)**

Causes	Possibles effets sur les chaussées	Nature de l'effet
Augmentation de la température dans les régions froides et augmentation du nombre de redoux hivernaux	Moins de détérioration des chaussées dues au soulèvement au gel et diminution de la fissuration thermique	+
	Possibles augmentation des dommages dus au dégel partiel des fondations (orniérage et fissuration de fatigue)	-
Augmentations des températures chaudes extrêmes	Augmentation des ornières de fluage	-
Augmentation de la disponibilité de l'eau durant les saisons estivales	Augmentation du niveau de la nappe phréatique avec des risques de diminution du module réversible du sol d'infrastructure	-
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes	Augmentation de l'eau dans la chaussée immédiatement après les pluies	-
	Augmentation de la teneur en eau dans les chaussées et réduction de leur rigidité.	-

## 4 Méthodologie et données

Tel qu'il a été exposé en introduction, les effets des changements climatiques peuvent être particulièrement importants lorsqu'ils font intervenir la performance des sols et matériaux dans la chaussée et non en surface. Ceci est dû au fait qu'il est relativement facile de remplacer une couche de revêtement et sa durée de vie tend à être assez courte. Par conséquent, le choix des bons paramètres de dimensionnement pour la couche de revêtement peut être fréquemment remis à jour lors du cycle de vie complet de l'ouvrage. D'un autre côté, les sols et les matériaux granulaires sont généralement mis en place pour plusieurs dizaines d'années et l'excavation est coûteuse. C'est pour cette raison que l'effet des changements climatiques sur la performance des chaussées flexibles doit être étudié avec attention en gardant ce fait en tête. Pour cette raison, les effets des changements climatiques influant sur la performance des matériaux de chaussées sous la surface doivent être privilégiés. Les documents consultés permettent de cibler les travaux sur deux principaux volets : 1. Augmentation des précipitations; 2. Adoucissement des températures hivernales.

Ce projet est donc été traité en se basant sur ces deux principaux volets. Chaque volet a été traité séparément dans le cadre d'un projet de maîtrise à l'Université Laval. Les résultats et analyses présentés dans ce rapport final constituent un résumé du contenu des mémoires de maîtrise (Thiam 2014; Perron Drolet 2014 – En cours de rédaction). Dans chaque projet, l'approche méthodologique suivante a été utilisée :

- Utilisation de simulations climatiques ciblées pour établir des scénarios d'évolution du climat selon les besoins du projet, l'expertise du consortium Ouranos ayant été mise à profit pour la réalisation de ces simulations climatiques;
- Modélisation ou utilisation de lois afin de transformer, si nécessaire, la variable climatique ou les variables climatiques en données d'intrants pour des calculs de chaussées;
- Quantification de la sensibilité des propriétés des matériaux de chaussée à la variation de la variable climatique étudiée par essais de laboratoire ou modélisation;
- Détermination de l'effet des changements climatiques sur la performance des chaussées;

Étant donné la structure du projet en deux volets distincts, les résultats sont traités de façon séparée dans ce rapport.

## **5 Résultats**

---

### ***5.1 Effet de l'augmentation des précipitations sur la performance des chaussées flexibles***

---

Tel qu'il a été discuté, un des effets attendus des changements climatiques au Québec est l'augmentation des précipitations. Il a été brièvement exposé que la conception et la performance des infrastructures, notamment les structures de chaussées, est fonction de la teneur en eau dans les sols support et dans les matériaux de chaussées. En effet, la résistance à l'endommagement, définie par le comportement en déformation permanente, et la rigidité, définie par le comportement réversible, sont deux paramètres de réponse mécanique des couches de chaussées significativement influencés par le degré de saturation.

Les travaux de recherche des dernières années ont permis de définir de façon satisfaisante la sensibilité à l'eau des matériaux de fondation et de sous-fondation de chaussées. Qui plus est, comme ces matériaux sont généralement plus drainants que les sols d'infrastructure puisque leur teneur en particules fines est limitée par les exigences du Ministère des Transports du Québec, les variations anticipées de leur degré de saturation auront potentiellement un effet moins significatif que sur les sols d'infrastructure. De leur côté, les sols support sont reconnus pour être plus sensibles à l'augmentation de leur degré de saturation. Comme une augmentation des précipitations peut conduire à une augmentation de la hauteur de la nappe phréatique, il est possible de s'attendre à ce que le comportement des sols d'infrastructure, et donc des chaussées en général, soit influencé par l'augmentation prévue des teneurs en eau. Pour ces raisons, dans le cadre de cette étude, il a donc été choisi de concentrer les travaux sur les sols d'infrastructure. La Figure 6 présente les résultats d'un suivi de la teneur en eau dans le sol d'infrastructure et dans les couches granulaires d'une chaussée flexible en Europe en fonction de la quantité de pluie. Il est possible d'observer qu'un événement de précipitations provoque généralement l'augmentation de la teneur en eau dans les couches, mais que le sol support est davantage affecté par ce phénomène. Cependant, de telles données sont assez rares au Québec et, afin de relier la quantité de précipitations à l'augmentation typique du degré de saturation dans les sols, l'analyse des résultats comme ceux présentés à la Figure 6 doit conduire à une équation mathématique pour quantifier l'impact sur une structure de chaussée.

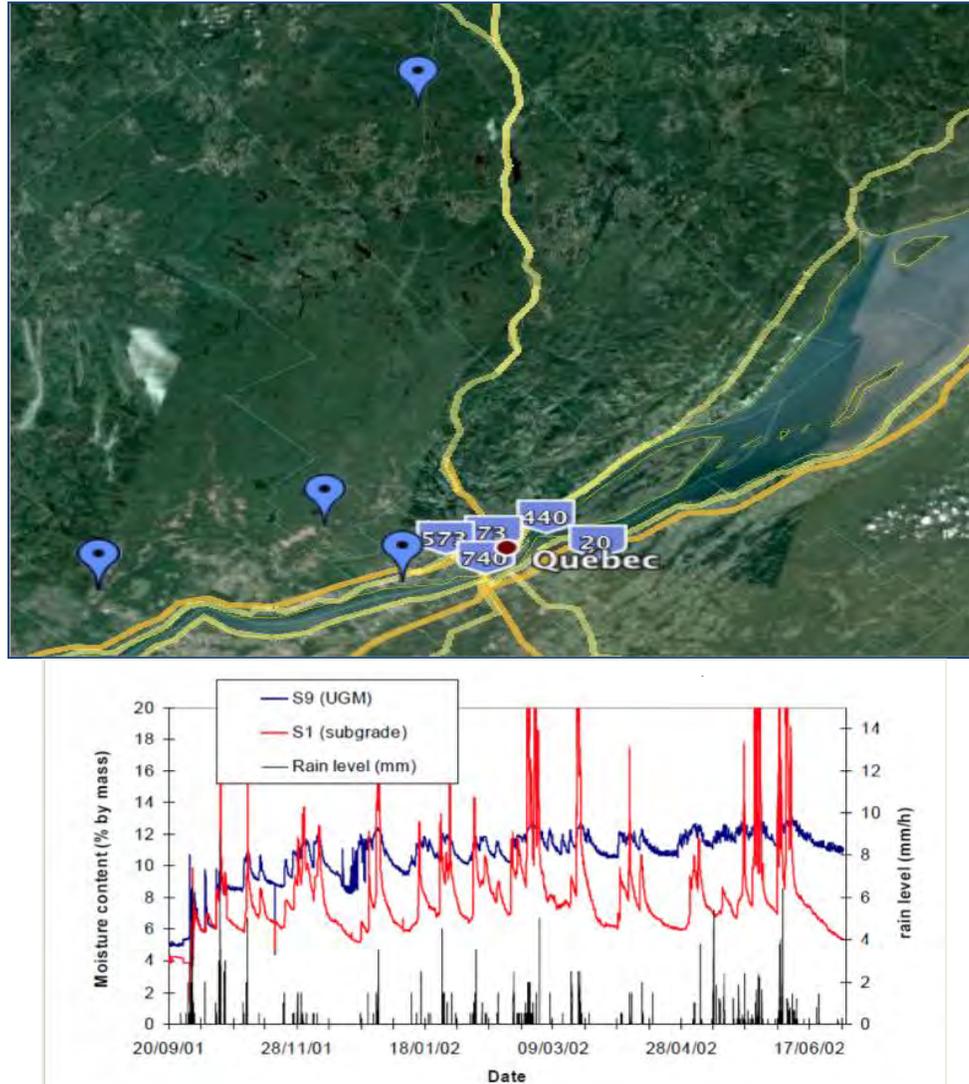


Figure 6. Relation entre les précipitations et la teneur en eau dans les sols et matériaux de chaussées (Carrera et al. 2009)

Afin de parvenir à établir et quantifier la relation entre l'augmentation des précipitations, et donc les changements climatiques, et la performance des chaussées flexibles, l'équipe de recherche a proposé une approche en quatre étapes distinctes. Ces étapes sont les suivantes :

1. Établissement d'une relation mathématique permettant de lier la variation de teneur en eau typique dans les sols d'infrastructure de chaussées et la quantité de précipitation;
2. Établissement de relations mathématiques entre le comportement mécanique, exprimé par le module réversible et la résistance à la déformation permanente, de sols d'infrastructure typiques et le degré de saturation. Dans le cadre de ce projet de recherche, quatre types de sols ont été échantillonnés (Figure 7) : sable uniforme (SP), sable silteux (SM), argile de faible plasticité (CL) et argile de haute plasticité (CH). La Figure 8 et le Tableau 3 présentent les résultats des essais de caractérisation.
3. Utilisation de scénarios climatiques pour quantifier l'augmentation probable des précipitations au Québec;
4. Calcul de l'effet sur la durée de vie des chaussées de l'augmentation des précipitations prévue. Cette étape utilise les valeurs identifiées en (3) comme intrants de l'équation définie en (1). Par la suite, les

équations définies en (2) peuvent être utilisées. Les variations de comportement mécanique en fonction des changements de degré de saturation peuvent alors être utilisées pour calculer les effets sur la durée de vie des chaussées.



Figure 7. Sites d'échantillonnage (Thiam 2014)

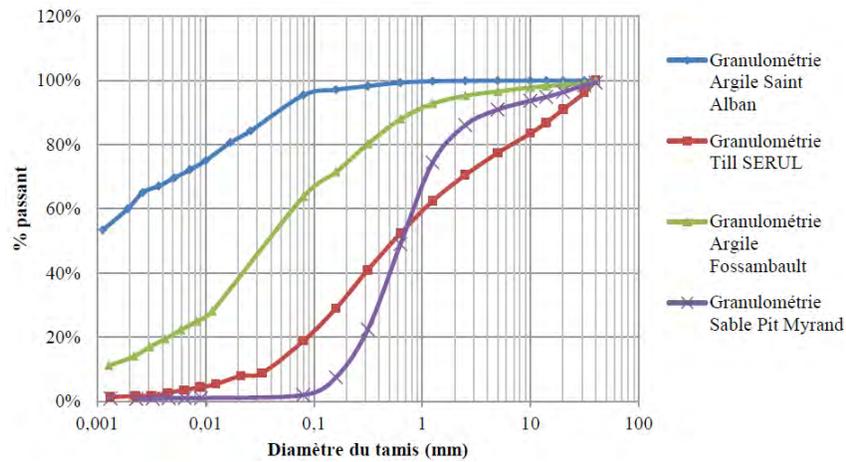


Figure 8. Courbes granulométriques des sols échantillonnés (Thiam 2014)

Tableau 3. Caractérisation des sols échantillonnés (Thiam 2014)

Type de sol	Till glaciaire	Sable	Argile	Argile
Nom selon classification unifiée	SM	SP	CH	CL
Provenance	SERUL	SCJC	Saint Alban	Saint-Augustin
% de fines (%)	18,9 %	2 %	95,4 %	63,8 %
Limite liquidité ( $W_L$ en %)	15,0 %	Sol non liquide	46,8 %	46,8 %
Limite Plasticité ( $W_P$ en %)	Sol non plastique	Sol non plastique	27,4 %	21,0 %
Indice de plasticité ( $I_p$ en %)	-	-	19,4 %	25,8 %
Valeur au bleu	0,038	0,002	0,900	0,670
Teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ en %)	5,9 %	9,9 %	18,0 %	14,2 %
Masse volumique sèche maximale ( $\rho_{d,max}$ en $kg/m^3$ )	2220,4	1883,3	1750,0	1860,9
Densité relative	2,76	2,74	2,82	2,77

### 5.1.1 Relation entre la teneur en eau des sols d'infrastructure de chaussées et les précipitations

Les données expérimentales de trois principaux sites ont été considérées pour cette analyse, celles recueillies au Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL), au site expérimental de Saint-Célestin et enfin celles de l'autoroute A210 au Manitoba. Dans tous les cas, des données de teneur en eau sont disponibles à chaque heure et la consultation des données des stations météo les plus près, ou la consultation de bases de données d'Environnement Canada, permet d'avoir les données de précipitations journalières ou mensuelles. L'analyse préliminaire des données a cependant révélé que, dans le cas des sites du SERUL et de Saint-Célestin, les données ont été recueillies sur une seule année dans la période novembre à juillet. Dans le cas de l'autoroute A-210 au Manitoba, des données sont disponibles pour une période de 3 années consécutives. La Figure 9 présente le sommaire des données de précipitation et de teneurs en eau pour ce site expérimental. De façon générale, il est possible de constater que les mois où les précipitations sont plus élevées sont associés à une augmentation de la teneur en eau volumétrique dans les sols de la structure de chaussée.

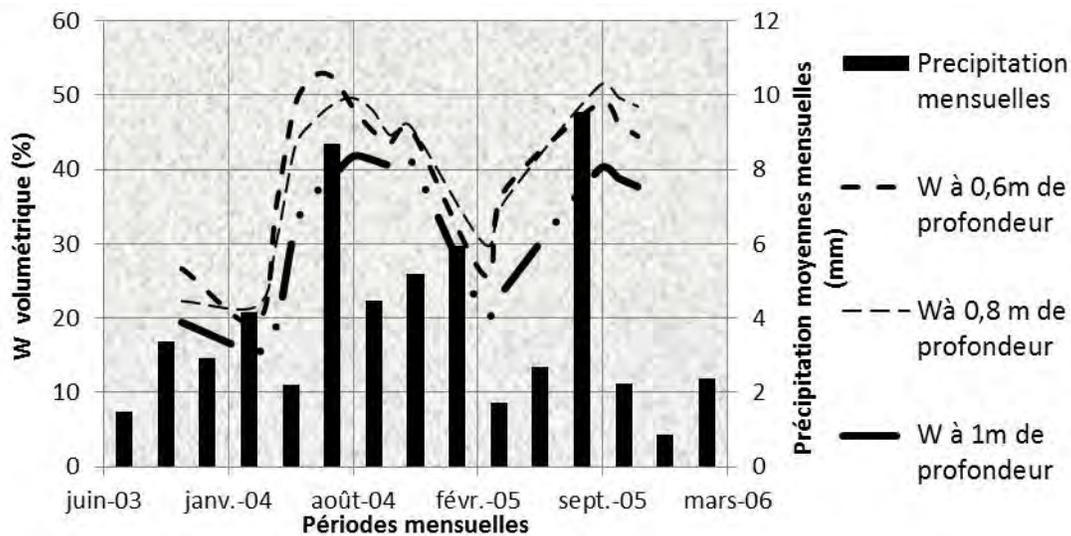


Figure 9. Teneurs en eau dans la chaussée et précipitations mensuelles pour l'autoroute 210 au Manitoba (Thiam 2014)

Afin de définir la relation entre la teneur en eau dans les sols et les précipitations, il est de mise d'exclure la période hivernale, étant donné que les précipitations sous forme de pluie sont très faibles ou inexistantes. Les données ont donc été analysées dans le but de séparer la période hivernale des autres périodes de l'année. Dans cette étude, la période hivernale ne correspond pas nécessairement à la définition typique, mais bien au moment où les précipitations sous forme de pluie sont minimales. L'analyse des données a révélé pour les sites expérimentaux que la période de mi-novembre au début mars correspond assez bien à ce critère. Ainsi, les données collectées dans cette période ont été exclues de l'analyse.

Avec la consultation des experts du consortium Ouranos, il a été décidé de convertir toutes les données de teneur en eau et de précipitations disponibles en données mensuelles. Ceci est dû au fait que, pour concorder avec les scénarios climatiques fournis dans le cadre de ce projet, les données doivent être sous format mensuel. En effet, les scénarios climatiques permettent d'obtenir l'augmentation des précipitations sur une base mensuelle. Il est donc important de faire correspondre les données des scénarios avec les données expérimentales. Par conséquent, les données horaires de teneur en eau ainsi que les données de précipitations journalières ont été converties en données mensuelles en calculant la moyenne (teneur en eau) et en faisant des cumuls (précipitations).

L'analyse des données a permis de constater qu'il existe un décalage temporel entre un événement de précipitation et un changement dans la teneur en eau du sol. Ceci est explicable par le fait que l'eau qui s'infiltré dans la chaussée par divers mécanismes et doit migrer jusqu'au niveau des sols d'infrastructure. Ce décalage temporel est particulièrement difficile à prendre en compte et est influencé par plusieurs variables, notamment :

- La géométrie de la chaussée;
- Le type de sol et la granulométrie;
- Le degré de saturation initial du sol avant l'augmentation de la teneur en eau;
- Les conditions de drainage sur le site de mesure.

Afin d'arriver à la meilleure relation mathématique entre l'augmentation de la teneur en eau dans les sols supports de chaussées et les précipitations, plusieurs scénarios (15) d'analyse de données ont été considérés pour prendre en compte ce décalage temporel. Ces scénarios ont consisté en diverses façons de calculer l'augmentation de la teneur en eau du sol  $\Delta W$  à partir de données consécutives ou rapprochées. Parmi les méthodes d'analyse considérées, celle montrant le coefficient de détermination pour une équation linéaire le plus élevé consiste à calculer  $\Delta W$  pour une précipitation à la période  $x$  à partir de la teneur en eau à une période  $x+1$  à laquelle est soustraite la valeur  $k$ , la teneur en eau la plus faible mesurée sur une longue période de temps. Celle-ci est définie par l'équation

$$\Delta W(\%) = W_{x+1} - k \quad (1)$$

dans laquelle  $W_{x+1}$  est la teneur en eau volumétrique pour la période  $x+1$  (%) et  $k$  la teneur en eau minimale mesurée sur une longue période de temps (%).

L'utilisation de cette méthodologie a permis de définir une relation mathématique optimisée entre l'augmentation de la teneur en eau  $\Delta W$  (%) et les précipitations  $P$  (mm) (moyenne mensuelle des précipitations journalières) entre les mois de mars et novembre. Cette relation mathématique est définie par

$$\Delta W(\%) = 0,9P - 0,1 \quad (2)$$

soit une équation linéaire de coefficient de détermination  $R^2=0,3$ . La Figure 10 présente cette relation. Les données des trois sites expérimentaux ont été utilisées pour le développement du modèle. Bien que relativement faible, le coefficient de détermination est satisfaisant compte du type de relation développée. En effet, tel qu'il a été discuté, il existe une multitude de facteurs pouvant influencer la relation entre ces deux paramètres. Des facteurs comme la géométrie de la route, le type de sols, la granulométrie, le type de matériaux présents dans la structure de chaussée, la condition de la couche de revêtement, les conditions de drainage du site, le niveau de saturation initial des sols, la profondeur, les conditions d'évaporation suite à l'épisode de précipitation (température et ensoleillement), constituent une explication importante à la variabilité, relativement importante, des données mises en graphique. Qui plus est, la mesure de la teneur en eau volumétrique dans les sols, par l'utilisation de capteurs de type ThetaProbe par exemple, ne présente généralement pas une très grande précision. Dans les meilleurs cas, où la calibration de la lecture de l'instrument de mesure en fonction de la condition du sol est possible, une erreur de mesure d'environ 1% de teneur en eau volumétrique est assez typique. De plus, le type de relation identifié et le niveau de corrélation associé est assez similaire à d'autres travaux répertoriés dans la littérature (Carrera et al. 2009).

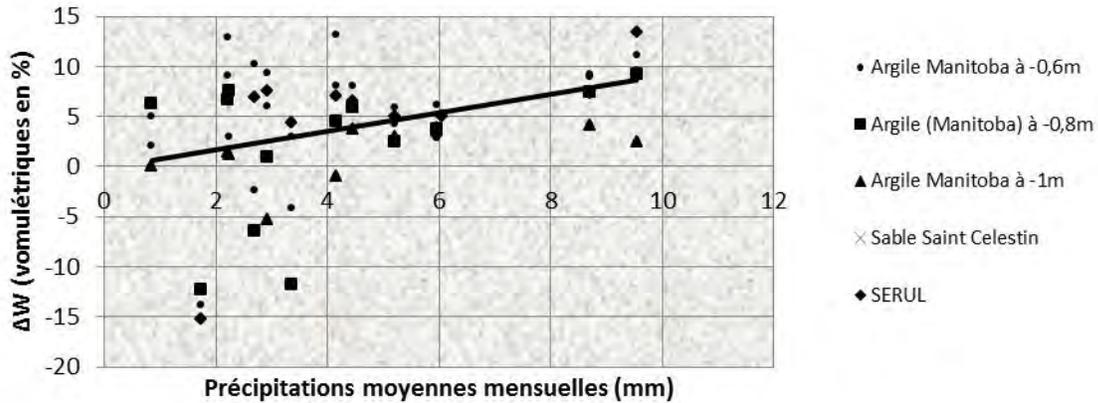


Figure 10. Relation proposée entre la teneur en eau dans les sols d'infrastructure et les précipitations (Thiam 2014)

### 5.1.2 Effet du degré de saturation sur le module réversible et la résistance à la déformation permanente des sols

Afin de quantifier dans quelle mesure varie le module réversible et la résistance à la déformation permanente des sols typiques identifiés (SP, SM, CL et CH), des essais de laboratoire ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique équipée d'une cellule triaxiale et d'un simulateur de charge roulante de laboratoire. Le premier outil a été utilisé pour étudier le module réversible et la déformation permanente, alors que le second a permis d'étudier le comportement en déformation permanente et de valider les essais triaxiaux. La Figure 11 présente ces deux équipements qui permettent de mesurer le comportement mécanique des sols d'infrastructure échantillonnés.



Figure 11. Presse hydraulique UTM-100 pour les essais de module réversible et déformation permanente en cellule triaxiale (Thiam 2014) et simulateur de charge roulante (Poupart 2013)

En cellule triaxiale, l'essai de module réversible a été réalisé en se basant principalement sur la norme AASHTO T-307 (AASHTO 2003) et l'essai de déformation permanente a été inspiré de plusieurs procédures disponibles dans la littérature (Thiam 2014). Dans le cas du module réversible, à la suite d'une phase de conditionnement,

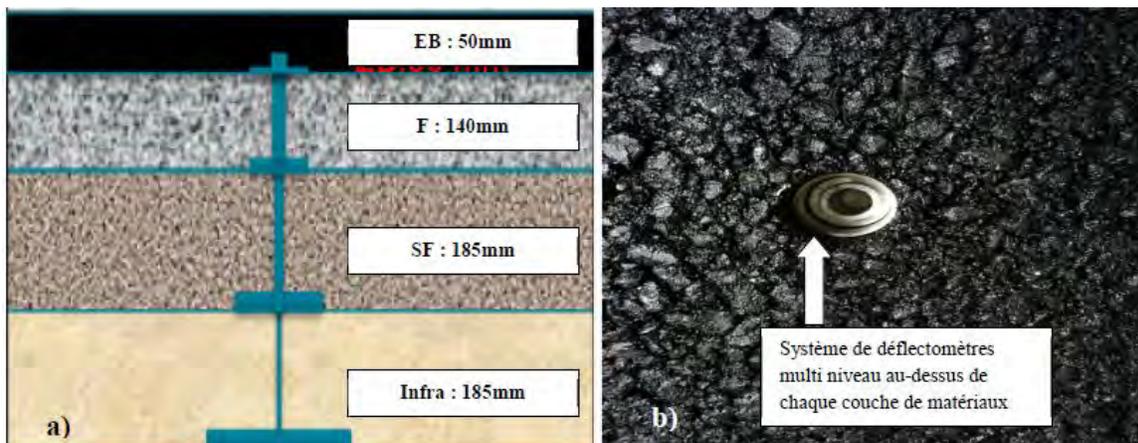
plusieurs cycles de charge cyclique sont appliqués à un échantillon de sol cylindrique compacté de 152 mm de diamètre et 300 mm de hauteur. Ces charges sont appliquées pour plusieurs niveaux de contraintes de confinement et de charges axiales afin de caractériser la dépendance du module réversible au niveau de contrainte subie par l'échantillon. L'essai est d'abord réalisé sur un échantillon à la teneur en eau optimale, et suite à un processus de saturation, il est aussi par la suite réalisé sur le même échantillon à une teneur en eau plus élevée. En ce qui concerne l'essai de déformation permanente, le niveau de contrainte est gardé constant durant l'essai. La dimension des échantillons testés a été de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur. Des contraintes axiales et de confinement représentatives de l'effet de la présence d'une structure de chaussée typique au-dessus ont été sélectionnées (contrainte déviatorique  $\sigma_d = 20$  kPa et contrainte de confinement  $\sigma_3 = 15$  kPa). Cet essai a été réalisé par paliers de conditions environnementales, soit deux paliers de 50 000 cycles de chargement à deux teneurs en eau différentes. Les résultats de l'essai de module réversible ( $Mr$ ) et de déformation permanente ( $\epsilon_p$ ) ont été modélisés avec les équations

$$Mr = K_1 Pa \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{K_2} \left( \frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{K_3} 10^{K_s(W-W_{opt})} \quad (3)$$

$$\epsilon_p = A \left( \frac{N}{1000} \right)^B \quad (4)$$

dans lesquelles  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_s$ ,  $A$  et  $B$  sont des constantes de régression,  $N$  est le nombre de cycles de chargement,  $Pa$  est la pression atmosphérique,  $W$  est la teneur en eau,  $W_{opt}$  est la teneur en eau optimale,  $\theta$  est la contrainte totale et  $\sigma_d$  est la contrainte déviatorique.

Le simulateur de charge roulante est un outil qui permet de tester le comportement d'une structure de chaussée à petite échelle sous une roue en mouvement. Dans le cadre de ce projet, la charge appliquée sur la roue et l'épaisseur des couches de la chaussée ont été optimisées afin d'obtenir un niveau de contrainte verticale au sommet du sol d'infrastructure similaire à celui imposé lors des essais de déformation permanente en cellule triaxiale. Afin de mesurer l'accumulation de déformation plastique (permanente), un système similaire à un déflectomètre multiniveau a été utilisé. Le déplacement relatif entre deux plaques consécutives permet d'obtenir la déformation de la portion de sol située entre les deux plaques en divisant le déplacement par l'espacement entre celles-ci. La Figure 12 présente la structure de chaussée et le système de mesure. La prise de mesure a été réalisée manuellement à l'aide d'une règle à ornieres et d'un vernier électronique. La modélisation des résultats obtenus au simulateur a été réalisée avec le même modèle que celui utilisé pour l'essai de déformation permanente.



La Figure 13 et la Figure 14, ainsi que le Tableau 4, présentent les principaux résultats associés à la réalisation des essais de module réversible. Ces figures confirment la dépendance à la contrainte et à la teneur en eau de ce paramètre mécanique. L'effet de la contrainte déviatorique est variable, principalement en fonction du niveau de confinement subi par l'échantillon. En ce qui concerne l'effet de la teneur en eau, le résultat typique montre que le module réversible diminue avec l'augmentation de la teneur en eau peu importe le niveau de contrainte appliqué. Il est aussi possible de constater que le modèle sélectionné semble assez bien représenter les données, car la courbe des données prédites en fonction des données mesurées montre une dispersion très serrée le long d'un axe  $y=mx$  (Figure 14).

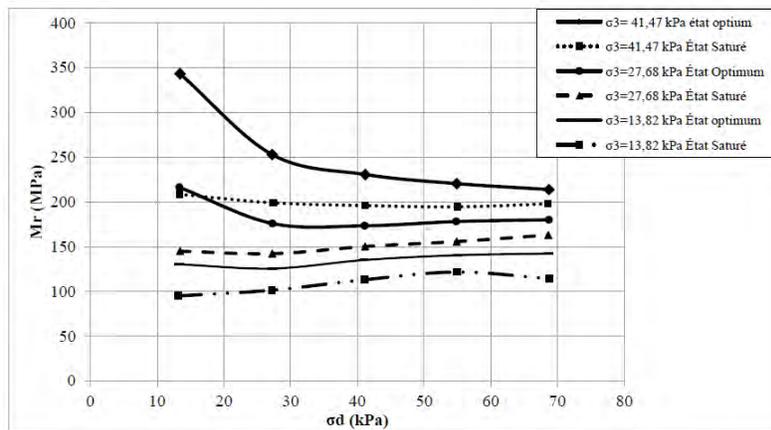


Figure 13. Résultat typique de module réversible (Sable SP) (Thiam 2014)

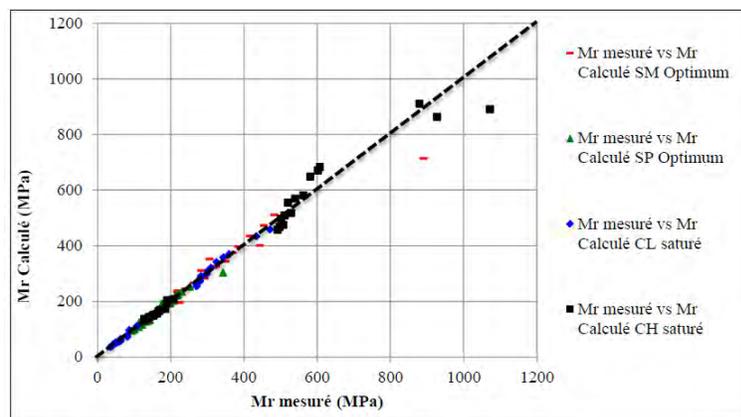


Figure 14. Module réversible prédit avec le modèle d'analyse en fonction du module réversible mesuré (Thiam 2014)

Tableau 4. Synthèse des paramètres de modélisation obtenus pour le module réversible (Thiam 2014)

Sols	$K_{1\text{ opt}}(\text{Uzan})$	$K_{2\text{ Opt}}(\text{Uzan})$	$K_{3\text{ opt}}(\text{Uzan})$	$\theta_{\text{opt}}$	$\sigma_{d\text{ opt}}$	$K_s$	$W_{\text{opt}}\text{ volumétrique}$
	-	-	-	MPa	MPa	-	%
Till SM	1,37	1,17	-0,64			-1,20	0,11
Sable SP	1,08	0,87	-0,38			-0,79	0,16
Argile CL	2,16	0,10	-0,37			-10,55	0,23
Argile CH	3,81	0,07	-0,41			-7,92	0,28

La Figure 15 et le Tableau 5 présentent le résultat des essais de déformation permanente en laboratoire effectués sur les quatre types de sols échantillonnés. La plupart des sols présentent un comportement relativement stable à la teneur en eau optimale. Certains sols présentent une sensibilité plus importante à l'augmentation de la teneur en eau vers un état plus près de la saturation. Le sol le moins sensible à l'augmentation de la teneur en eau est celui contenant le moins de particules fines et le plus uniforme, ce qui est en accord avec les principes reconnus en mécanique des sols. La performance à long terme des sols est caractérisée par le taux de déformation permanente, associé à la variation de la déformation permanente avec le nombre de cycles. Ce taux est le paramètre de régression B du modèle sélectionné pour l'analyse des essais de déformation permanente (Tableau 5). Les valeurs de paramètre sont synthétisées au Tableau 5. L'augmentation de la teneur en eau provoque une augmentation du paramètre B pour les deux sols les plus grossiers (SP et SM), mais la valeur de B tend à diminuer pour les deux sols argileux. Cependant, puisque la valeur de A (déformation permanente à 1000 cycles de chargement) est beaucoup plus élevée à l'état près de la saturation pour ces deux sols, l'endommagement à long terme sera aussi beaucoup plus élevé pour une forte teneur en eau. Ce comportement particulier peut être expliqué par la capacité de drainage du sol. En effet, pour ce type de sol, l'eau peut demeurer coincer dans les pores, ce qui peut atténuer le taux de déformation à long terme dû au caractère incompressible de ce fluide.

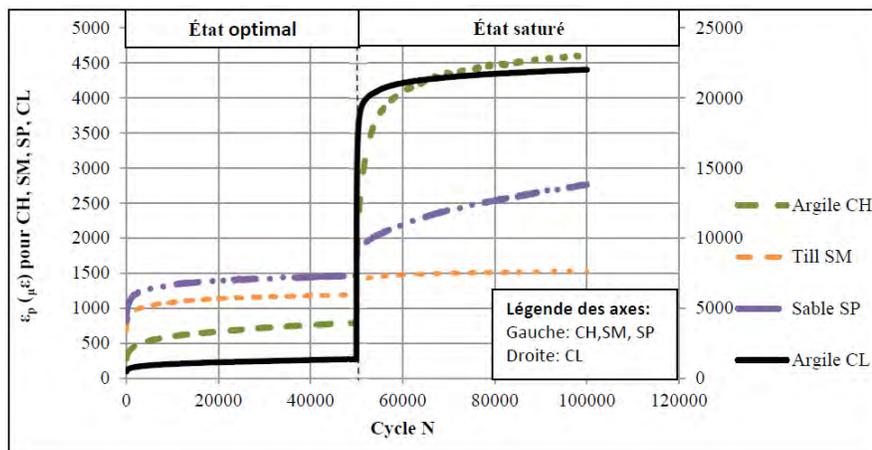


Figure 15. Résultats des essais de déformation permanente en laboratoire (Thiam 2014)

Tableau 5. Résultats de la modélisation des essais de déformation permanente en laboratoire (Thiam 2014)

Modèle de puissance	Type sol	Argile CL		Argile CH		Till SM		Sable SP	
		Opt.	Sat.	Opt.	Sat.	Opt.	Sat.	Opt.	Sat.
	W vol.	28,84	34,43	25,06	43,25	13,32	19,75	17,18	35,08
		%	%	%	%	%	%	%	%
$\varepsilon_p = A \left( \frac{N}{1000} \right)^B$	Coeff déterm.	0,99	0,81	0,99	0,90	0,99	0,97	0,99	0,99
	A	694,6	17 687	405,8	2276,4	932,7	218,4	1150,1	366,6
	B	0,17	0,04	0,17	0,14	0,06	0,11	0,06	0,32

La réalisation des essais de déformation permanente en cellule triaxiale à deux teneurs en eau nécessite, afin d'atteindre les principaux objectifs du projet, de modéliser l'effet de ce paramètre. Il a été choisi, dès l'élaboration de la méthodologie, de réaliser l'essai à seulement deux teneurs en eau, étant donné la quantité importante d'essais de laboratoire devant être effectués dans le cadre de ce projet. La quantification de l'effet de la teneur en eau sur le comportement en déformation permanente a été rendue nécessaire par le fait qu'il n'existe aucun modèle satisfaisant dans la littérature permettant de bien prendre en compte ce phénomène. Ainsi, les résultats obtenus sont utilisés pour modéliser comment évolue la déformation permanente des sols (B) en fonction des changements de degrés de saturation. Cette évaluation est toutefois limitée à deux teneurs en eau. À ce stade-ci, il s'agit donc d'une évaluation approximative puisqu'il aurait fallu plus sieurs essais supplémentaires afin de bien caractériser

cette relation. Les relations identifiées entre le taux de déformation permanente (B) et la teneur en eau volumétrique sont définies par

$$\text{Sol SP : } B = 1.4169W_{vol} - 0.1812 \quad (5)$$

$$\text{Sol SM : } B = 0.7424W_{vol} - 0.035 \quad (6)$$

$$\text{Sol CL : } B = -2.2093W_{vol} + 0.8031 \quad (7)$$

$$\text{Sol CH : } B = -0.1391W_{vol} + 0.2026 \quad (8)$$

dans lesquelles  $W_{vol}$  est la teneur en eau volumétrique (%) et B est le taux de déformation permanente.

En ce qui concerne l'étude du comportement en déformation permanente en utilisant le simulateur de charge roulante, cette partie de l'étude n'a été réalisée que sur deux sols (SM et CL) et pour deux valeurs de degré de saturation étant donné l'importante logistique associée à la réalisation de ce type d'essai. Tout comme l'essai de déformation permanente en cellule triaxiale, cet essai a été réalisé par paliers de teneur en eau à raison de 50000 cycles de chargement par palier. Le Tableau 6 et la Figure 16 présentent les principaux résultats obtenus lors de ces essais. Il est possible de constater que le sol argileux (CL) est plus sensible à l'augmentation de la teneur en eau que le sol silteux (SM), les valeurs de B et de A augmentant toutes les deux suivant l'augmentation de la teneur en eau. Comme il a été fait pour les essais de déformation permanente en cellule triaxiale, la relation entre le paramètre B et la teneur en eau volumétrique a été établie. Pour les deux sols testés, cette relation est définie par

$$\text{Sol SM : } B = 1.6744W_{vol} - 0.0353 \quad (9)$$

$$\text{Sol CL : } B = 0.7870W_{vol} + 0.3603 \quad (10)$$

dans lesquelles  $W_{vol}$  est la teneur en eau volumétrique (%) et B le taux de déformation permanente.

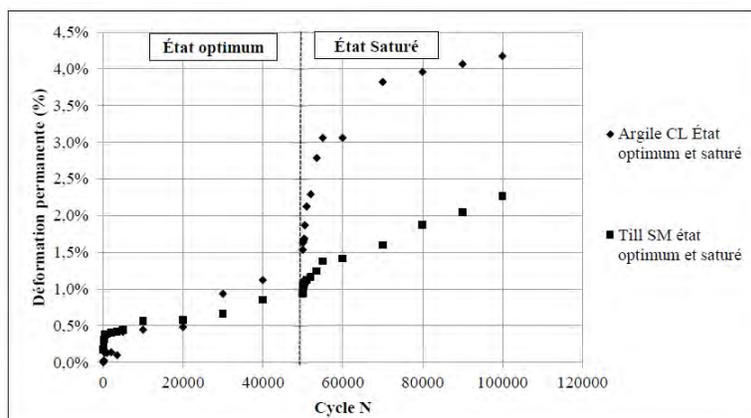


Figure 16. Résultats des deux essais au simulateur de charge roulante (Thiam 2014)

**Tableau 6. Synthèse de la modélisation des résultats obtenus avec le simulateur de charge roulante (Thiam 2014)**

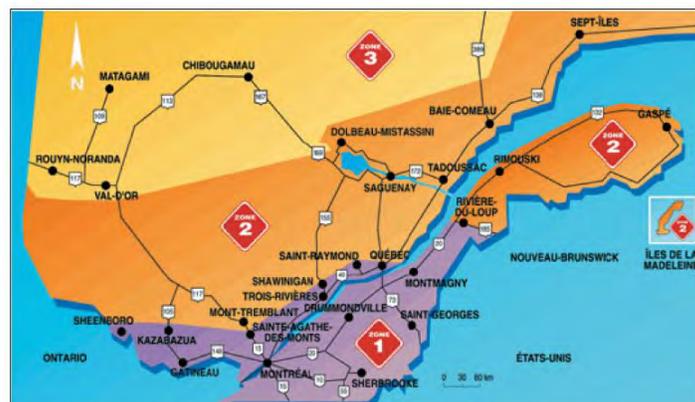
Modèle de puissance	Type de sol	Argile CL		Till SM	
		Optimum	Saturé	Optimum	Saturé
$\varepsilon_p = A \left( \frac{N}{1000} \right)^B$	W volumétrique	29,0 %	36,7 %	13,4 %	26,7 %
	Coef. Détermina.	0,92	0,84	0,92	0,97
	Paramètre A	0,0016	0,0037	0,0037	0,0021
	Paramètre B	0,5885	0,6491	0,1891	0,4118

La réalisation des essais de laboratoire a permis d'établir, autant pour le module réversible que pour la déformation permanente, la relation entre les propriétés mécaniques des sols et la teneur en eau. En utilisant la relation établie entre les précipitations et la teneur en eau dans les sols de chaussées ainsi que les modèles établis pour décrire comment évoluent les propriétés mécaniques avec la teneur en eau, il est possible de faire le lien entre les précipitations et le comportement mécanique des sols. Pour faire l'analyse du comportement des chaussées en contexte de changements climatiques, le chaînon manquant est associé aux scénarios climatiques d'augmentation des précipitations.

### 5.1.3 Scénarios climatiques pour l'augmentation des précipitations

Afin de prédire l'effet de l'augmentation des précipitations sur les ouvrages routiers, il est nécessaire de quantifier cette augmentation afin de l'introduire dans les modèles proposés aux sections 2.1 et 2.2. Les scénarios climatiques pour la période mars à novembre ont été obtenus grâce à la collaboration du consortium Ouranos. L'objectif était de quantifier le plus précisément possible les augmentations prévues des précipitations dans la portion sud de la Province de Québec.

Afin de prendre en compte l'effet de la position géographique, le sud du Québec a été subdivisé en trois zones distinctes. Celles-ci sont calées sur les zones de restriction de charge au dégel utilisées par le Ministère des Transports du Québec (MTQ 2012) (Figure 17). Les zones sont identifiées de 1 à 3, la zone 1 étant la plus au Sud (centrée dans le corridor Québec-Montréal), la zone 2 incluant des régions comme la Gaspésie, Saguenay Lac Saint-Jean, la Côte Nord, et la zone 3 le nord du Québec. Afin de réaliser l'analyse, il a été décidé de calculer les moyennes climatiques de période de 1971-2000 afin d'obtenir la période de référence. La période future, établie à 2010-2039, a été choisie assez proche du présent compte tenu de la durée de vie relativement courte des ouvrages routiers et dans l'objectif que ces travaux soient applicables à court terme par les gestionnaires de réseaux.



**Figure 17. Délimitation des trois régions étudiées (MTQ 2012)**

Pour chaque zone étudiée, 10 simulations du Modèle Climatique Régional 4<sup>ème</sup> génération, soit le MRCC4, ont été obtenus de la part d'Ouranos. Les 10 simulations diffèrent les unes des autres en termes de versions du modèle utilisées (3), domaines de simulation (2) (domaine Québec et domaine Amérique du Nord), modèles de circulation générale ou pilotes (2) (canadien – CGCM3 et allemand ECHAM5) et membres (3) (2 associés au pilote canadien

et 1 au pilote allemand). Ainsi, cette approche permet d'obtenir selon les combinaisons utilisées entre les versions du modèle, domaines, pilotes et membres, 10 futurs différents équiprobables.

La variation du climat, notamment l'augmentation des précipitations, dans un horizon futur est associée par les experts à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Une partie importante des scénarios d'augmentation des GES, basés sur des scénarios démographiques, technologiques, économiques et politiques, est produite par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Dans le cadre de cette étude, le scénario le plus courant à Ouranos, le scénario A2 du GIEC, a été utilisé. Celui-ci est considéré comme étant assez pessimiste, car il produit un réchauffement climatique assez important, mais non différent d'autres scénarios jusqu'à environ 2050. Ainsi, le scénario climatique a été utilisé comme intrant dans les simulations du climat. Les gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont une incidence sur le climat et les modèles utilisés permettent de prendre en compte ce paramètre et de simuler l'évolution dans le temps du climat avec l'évolution des GES. Ainsi, une augmentation des GES dans le temps fait évoluer le climat, tel que prédit par les modèles. En termes de variation des précipitations mensuelles pour la période 2010-2039 et pour les trois zones étudiées, les tableaux Tableau 7 à Tableau 9 présentent en pourcentage ces changements pour chaque simulation climatique considérée. Afin de correspondre à l'analyse effectuée, les valeurs sont aussi présentées pour la période mars à novembre. Deux scénarios différents sont présentés : 10<sup>ème</sup> percentile (moins grands changements) et 90<sup>ème</sup> percentile (changements plus importants). Il est à noter que les changements climatiques prévus, en termes de changements de précipitations, selon ces simulations sont assez faibles (<10%). Ceci est entre autres explicable par :

- La période future choisie, qui est proche du présent;
- Les changements en été sont plus faibles qu'en hiver selon les modèles;
- Trois zones dans le sud de la Province sont étudiées, alors que le signal d'augmentation des précipitations est plus fort au Nord.

**Tableau 7. Augmentation des précipitations pour la zone 1 (période 2010-2039)**

Code	Zone 1										10e perc (%)	90e perc (%)
	aev	aet	agx	acu	adc	afx	adj	adl	agr	aha		
jan	4,27	2,51	6,51	0,09	10,58	0,03	6,28	10,64	11,38		0,08	10,71
fév	4,56	23,34	20,76	3,59	-3,31	3,35	19,46	0,19	-4,43	37,47	-3,42	24,75
mars	9,85	21,94	-7,56	17,72	20,54	15,89	11,84	12,60	21,75	-9,85	-7,78	21,77
avril	7,89	-10,26	3,63	-4,81	13,24	-4,16	-10,89	4,73	13,23	-6,06	-10,3	13,23
mai	23,70	7,10	12,75	-1,65	20,14	-1,53	12,42	28,32	16,32	1,93	-1,54	24,16
juin	-2,94	-0,53	0,63	-0,44	-2,62	-1,24	-8,91	4,93	-1,12	-7,89	-7,99	1,06
juillet	-3,82	-3,34	10,43	1,65	-1,43	1,80	0,74	-2,14	-2,12	5,93	-3,39	6,38
août	-4,52	-4,72	1,12	0,35	0,61	1,83	5,86	-11,76	-0,92	7,44	-5,42	6,02
sept	8,72	6,46	8,53	1,29	9,62	0,40	-0,77	15,67	7,80	0,95	0,29	10,22
oct	10,27	2,38	-10,74	-6,23	5,96	-5,60	-4,25	6,97	4,25	-10,51	-10,5	7,30
nov	-11,16	5,42	10,57	0,16	-3,25	0,83	4,94	-7,91	-2,31	6,10	-8,23	6,54
déc	5,74	15,40	14,44	8,78	10,41	8,75	17,56	12,64	11,36	4,97	5,67	15,61
moy. ann.	4,38	5,47	5,92	1,71	6,71	1,70	4,52	6,24	6,27	2,60	1,71	6,31
moy.mars à nov	4,22	2,72	3,26	0,89	6,98	0,91	1,22	5,71	6,32	-1,33	0,67	6,39

**Tableau 8. Augmentation des précipitations pour la zone 2 (période 2010-2039)**

Code	Zone 2										10e perc	90e perc (%)
	aev	aet	agx	acu	adc	afx	adj	adl	agr	aha		
jan	24,29	2,96	-0,53	-1,01	12,01	-0,32	2,26	15,65	13,99	0,63	-0,57	16,52
fév	5,86	14,93	10,80	9,17	3,92	8,89	15,97	2,09	3,27	22,69	3,15	16,64
mars	15,94	17,70	-11,33	11,80	26,23	13,85	13,36	13,54	26,76	-5,18	-5,79	26,28
avril	7,34	-1,67	10,55	0,18	15,54	0,60	-7,02	-1,95	12,71	-1,06	-2,45	12,99
mai	21,99	8,26	9,36	1,77	17,66	2,17	11,77	23,64	16,04	-5,07	1,08	22,16
juin	5,48	-2,10	-1,83	-1,62	3,93	-1,88	-7,00	8,13	2,53	-6,91	-6,92	5,75
juillet	0,48	-2,70	4,05	-3,61	3,64	-5,37	-0,01	-1,28	2,66	1,90	-3,79	3,68
août	-2,64	-7,90	2,80	-3,82	5,91	-3,96	-3,73	-4,64	4,58	6,71	-4,97	5,99
sept	5,26	-6,09	1,66	0,00	1,13	0,12	-1,32	7,13	-0,09	6,79	-1,79	6,83
oct	4,82	3,16	-2,85	-3,42	3,78	-3,58	4,39	6,19	3,33	-2,20	-3,44	4,96
nov	-11,73	-0,01	3,04	-2,85	-3,68	-2,79	-0,12	-7,00	-2,78	7,51	-7,47	3,48
déc	6,79	13,20	10,69	3,83	18,11	4,21	11,42	15,82	17,29	4,81	4,17	17,37
moy. ann.	6,99	3,31	3,03	0,87	9,02	0,99	3,33	6,44	8,36	2,55	0,98	8,42
moy.mars à nov	5,21	0,96	1,72	-0,18	8,24	-0,09	1,15	4,86	7,31	0,28	-0,10	7,40

**Tableau 9. Augmentation des précipitations pour la zone 3 (période 2010-2039)**

Code	zone 3										10e perc	90e perc (%)
	aev	aet	agx	acu	adc	afx	adj	adl	agr	aha		
jan	24,22	1,40	0,12	-1,77	10,44	-0,77	-5,39	19,15	11,73	2,92	-2,13	19,66
fév	17,74	12,88	1,36	8,36	25,00	7,30	17,16	13,84	26,01	0,52	1,28	25,10
mars	22,97	11,39	-8,55	10,77	30,61	12,79	11,23	17,92	31,78	-10,24	-8,72	30,72
avril	10,52	3,64	4,48	3,31	12,10	2,58	-1,91	2,96	12,01	-7,01	-2,42	12,02
mai	14,23	8,84	-0,17	11,36	13,38	12,31	13,32	12,67	14,08	-2,98	-0,45	14,10
juin	11,24	-2,69	-3,82	-0,48	5,29	-2,21	-0,49	13,20	2,99	-3,73	-3,74	11,44
juillet	5,93	-1,70	5,94	-7,07	6,22	-7,98	-1,43	-2,20	6,41	9,29	-7,16	6,70
août	1,60	-4,96	7,69	-2,59	8,13	-3,22	-3,70	-4,48	8,47	12,77	-4,53	8,90
sept	-1,55	-10,14	6,24	4,67	4,89	4,98	-1,52	-1,41	4,68	8,72	-2,41	6,48
oct	6,52	-0,23	2,12	-1,80	3,07	-1,95	2,45	5,09	2,83	12,86	-1,81	7,16
nov	-6,50	7,22	6,48	6,18	-7,69	6,71	9,40	-4,63	-6,76	7,82	-6,85	7,98
déc	12,99	14,01	10,41	10,07	21,53	10,21	8,68	21,38	20,41	3,02	8,11	21,39
moy. ann.	9,99	3,30	2,69	3,42	11,08	3,40	3,98	7,79	11,22	2,83	2,82	11,09
moy.juin-oct	7,22	1,26	2,27	2,70	8,44	2,67	3,04	4,35	8,50	3,06	2,17	8,45

La Figure 18 présente les moyennes mensuelles obtenues des banques de données d'Environnement Canada et Ouranos pour la période de référence 1971-2000 pour chacune des zones. Les précipitations mensuelles de 13 villes ont été obtenues afin de calculer une moyenne globale de précipitations mensuelles pour chacune des zones. Ces villes ont été sélectionnées afin d'être représentatives du territoire associé à chacune des zones. La Figure 18 présente les précipitations moyennes pour chacune des zones et pour la période de référence.

Afin de déterminer les précipitations futures, comme les simulations ont permis d'obtenir des variations en pourcentage (approche delta), il a été nécessaire d'appliquer les valeurs en pourcentage de la période future à la période référence. Cette approche permet de corriger les biais systématiques du modèle (annulation par soustraction d'une partie des biais) et de ramener un résultat régional à une échelle locale. Ainsi, les précipitations futures  $P_{2010-2039}$  sont déduites des précipitations de la période référence  $P_{1971-2000}$  à partir de l'équation

$$P_{2010-2039} = P_{1971-2000} \left( \frac{\Delta P}{100} + 1 \right) \quad (11)$$

dans laquelle  $\Delta P$  est l'augmentation de précipitation en pourcentage prévue par les modèles. La Figure 19 présente les résultats de cette analyse. En fonction des scénarios, des variations de précipitations de -0,1 mm à 6,2 mm peuvent être attendues. Le scénario du 10<sup>ème</sup> percentile donne des variations très faibles, tel que prévu, particulièrement pour la zone 2. En ce qui concerne le scénario du 90<sup>ème</sup> percentile, c'est la zone 3 qui donne le changement (augmentation) le plus marqué.

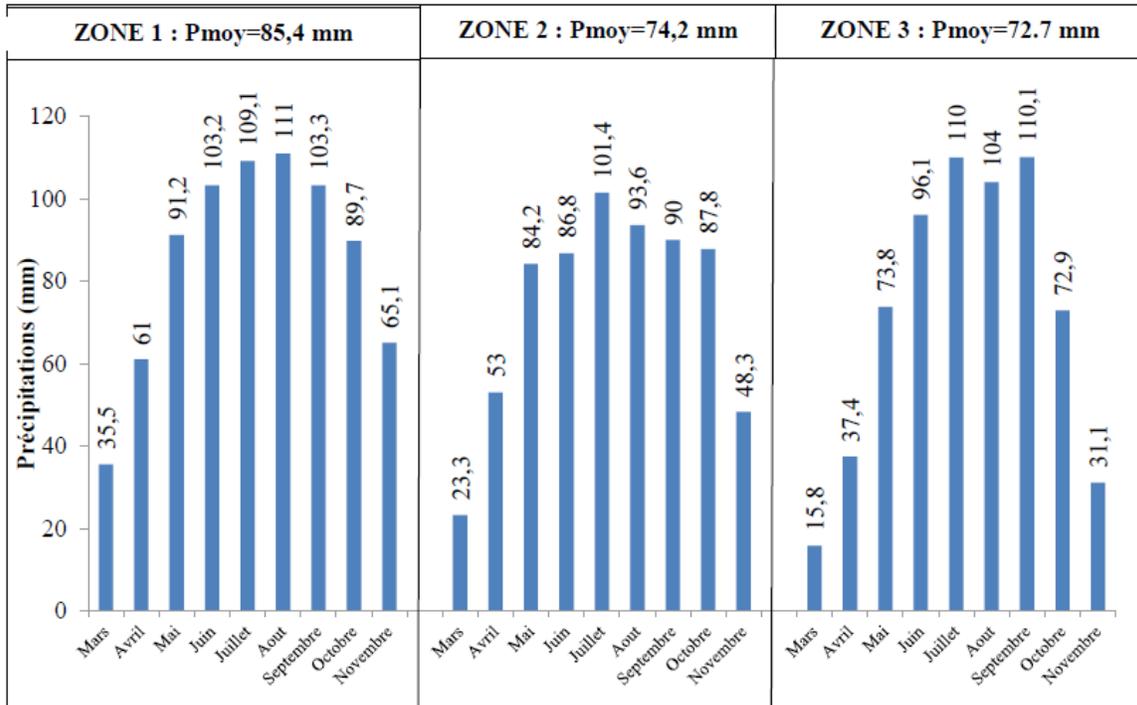


Figure 18. Précipitations moyennes mensuelles de mars à novembre pour la période 1971-2000 (Thiam 2014)

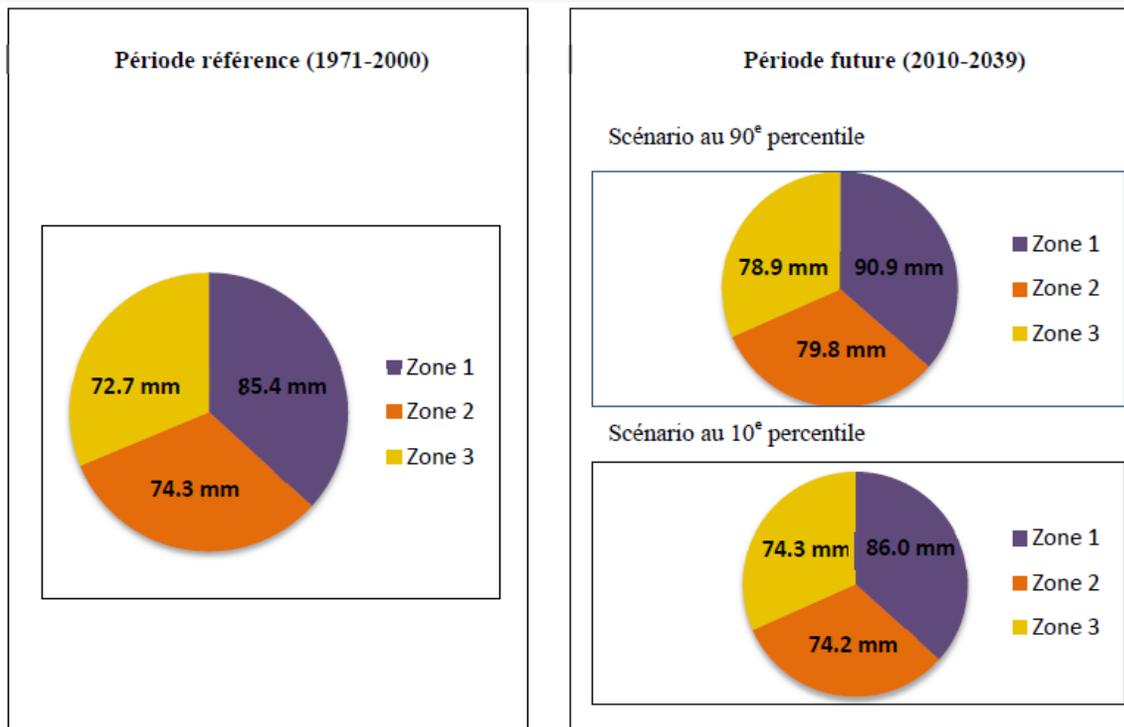


Figure 19. Variation de précipitations pour chacune des zones pour la période future (Thiam 2014)

#### 5.1.4 Effet des variations des précipitations sur l'endommagement et la performance à long terme des chaussées flexibles

Les analyses réalisées dans les sections précédentes peuvent être intégrées afin d'effectuer une étude de l'effet des changements de précipitations sur la performance et l'endommagement des routes. La section 2.3 a permis de quantifier les variations anticipées de précipitations dans un contexte de changements climatiques. Ces données servent d'intrants au modèle développé dans la section 2.1 qui relie les précipitations à la teneur en eau des sols d'infrastructures de chaussées flexibles. Finalement, les variations de teneur en eau peuvent être traduites en variation des propriétés mécaniques des sols d'infrastructures (section 2.2), qui à leur tour sont associées à l'endommagement et à la performance des chaussées flexibles. Cette relation est étudiée dans cette section et est traitée pour six cas, soient les scénarios du 10<sup>ème</sup> percentile et du 90<sup>ème</sup> percentile pour les trois zones étudiées.

L'analyse de la performance des chaussées est orientée sur les trois essais de performance mécanique, qui ont permis de montrer que les paramètres d'intérêt varient avec la teneur en eau des sols. En ce qui concerne le module réversible, la rigidité des couches dans un système multicouche influence les déformations mesurées dans le système. En conception de chaussées selon les principes mécaniste-empiriques, la déformation verticale mesurée au sommet du sol support est directement associée à la durée de vie des chaussées  $N$ , exprimée en équivalent de charges axiales simples (ÉCAS). Plusieurs lois dites « fonction de transfert empirique » permettent de lier ces deux paramètres. La loi de l'Asphalt Institute est parmi les plus utilisées. Cette loi assume que la majorité de l'orniérage de surface provient du sol support et suggère que, pour une déformation élastique verticale donnée au sommet du sol support, un nombre  $N$  de charge pourra être répété avant d'atteindre une ornière en surface de chaussée de 12,5 mm. La loi de l'Asphalt Institute est généralement est définie par

$$N(\acute{E}CAS) = 10^6 \left( \frac{\varepsilon_z}{k} \right)^{-a} \quad (12)$$

dans laquelle  $k=482$ ,  $a=4,48$  et  $\varepsilon_z$  est la d  deformation verticale au sommet du sol d'infrastructure. Pour une chaussée ayant des caractéristiques et propriétés connues, il est possible de calculer la d  deformation verticale au sommet du sol support. Dans le cadre du premier volet de ce projet, la structure de chaussée pr esent e au Tableau 10 a été mod el is e dans un logiciel de calcul multicouche linéaire élastique afin de quantifier la d  deformation élastique verticale au sommet du sol d'infrastructure sous un chargement de réference (40 kN). Cette d  deformation a été calcul e avec des propriétés mécaniques du sol support (module réversible) pour la p eriod e réference qui sont associée aux conditions optimales de teneur en eau et aux modules réversibles qui y sont associ es. Pour la p eriod e future, l'augmentation des précipitations a été appliquée afin d'obtenir une augmentation de teneur en eau et une diminution de module réversible. Ce module réduit a été introduit dans le logiciel multicouche linéaire élastique pour calculer une nouvelle d  deformation verticale et une nouvelle durée de vie. L'endommagement relatif a été calcul e avec

$$Domm\grave{a}ge\ relatif\ (Mr) = \frac{N_{2010-2039}}{N_{1971-2000}} \quad (13)$$

dans laquelle le ratio entre le nombre de passages avant l'ornière maximale pour la p eriod e future est ci-dessus divis e par celui de la p eriod e réference.

**Tableau 10. Structure de chaussée mod el is e pour l'analyse d'endommagement (Thiam 2014)**

Matériaux	�paisseur	Mr	Coefficient poisson	Charge axiale	Aire
	mm	MPa	-	kN	mm <sup>2</sup>
Enrobé bitumineux	100	2500	0.35	40	70686
Fondation	200	300	0.35		
Sous fondation	575	150	0.35		

Pour ce qui est des essais en d  deformation permanente (triaxial et simulateur de charge), le paramètre B obtenu par la modélisation des résultats est en soi un paramètre de dommage, contrairement au module réversible qui est un paramètre de conception. Ainsi, dans le cas du module réversible, il a été nécessaire de faire un calcul supplémentaire afin de quantifier la performance de la chaussée (exprimée par le nombre de passages admissible avant l'ornière maximale N). Le paramètre B est lui directement un paramètre de performance. Ainsi, pour quantifier l'effet des changements climatiques, le paramètre B en conditions optimales a été associ e   la teneur en eau optimale pour la p eriod e de réference. Pour la p eriod e future, l'augmentation des précipitations a été utilisée pour déterminer une augmentation de teneur en eau et une augmentation du paramètre B pour la p eriod e future. Ainsi, le dommage relatif entre la p eriod e présente et la p eriod e future est calcul e, dans ce cas,   l'aide de

$$Domm\grave{a}ge\ relatif\ (\varepsilon_p) = \frac{B_{1971-2000}}{B_{2010-2039}} \quad (14)$$

Les figures Figure 20   Figure 25 présentent les résultats des dommages relatifs obtenus pour chaque analyse réalisée (module réversible et d  deformation permanente). Les résultats sont pr esent es pour chaque zone et chaque scénario considère. Les histogrammes permettent par ailleurs d'apprécier l'effet du type de sol d'infrastructure.

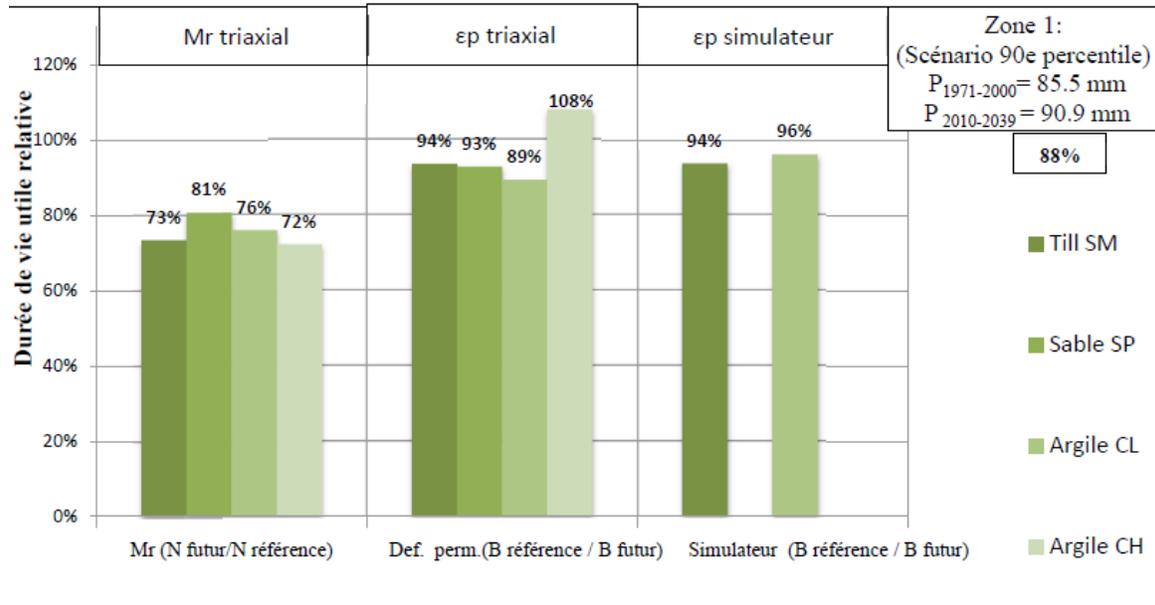


Figure 20. Dommage relatif – Zone 1 – 90<sup>ème</sup> percentile (Thiam 2014)

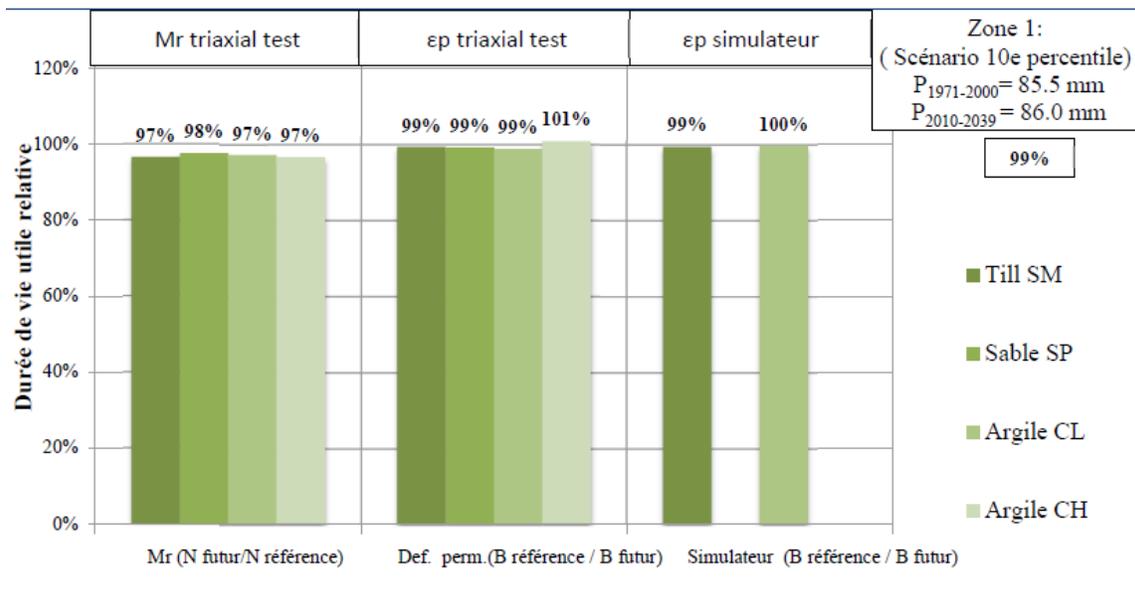


Figure 21. Dommage relatif – Zone 1 – 10<sup>ème</sup> percentile (Thiam 2014)

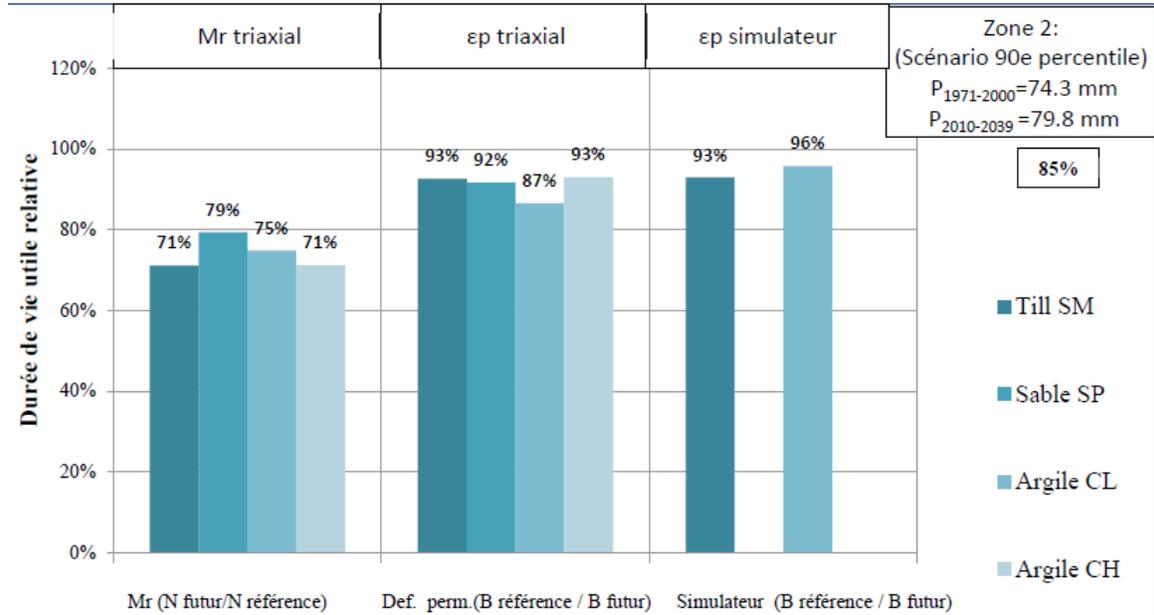


Figure 22. Dommage relatif – Zone 2 – 90<sup>ème</sup> percentile (Thiam 2014)

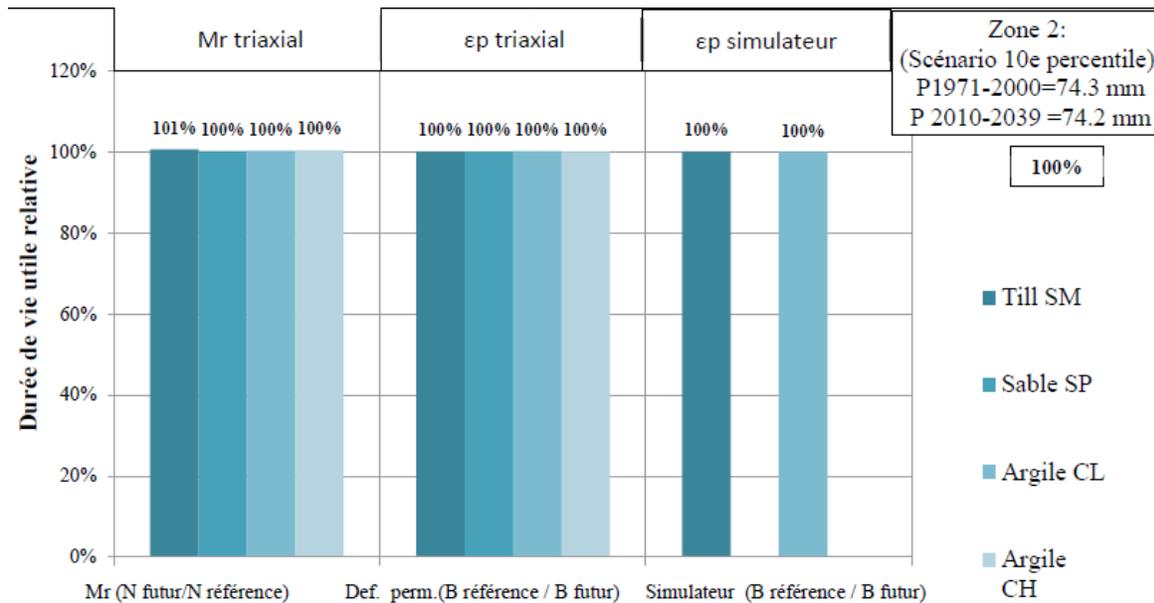
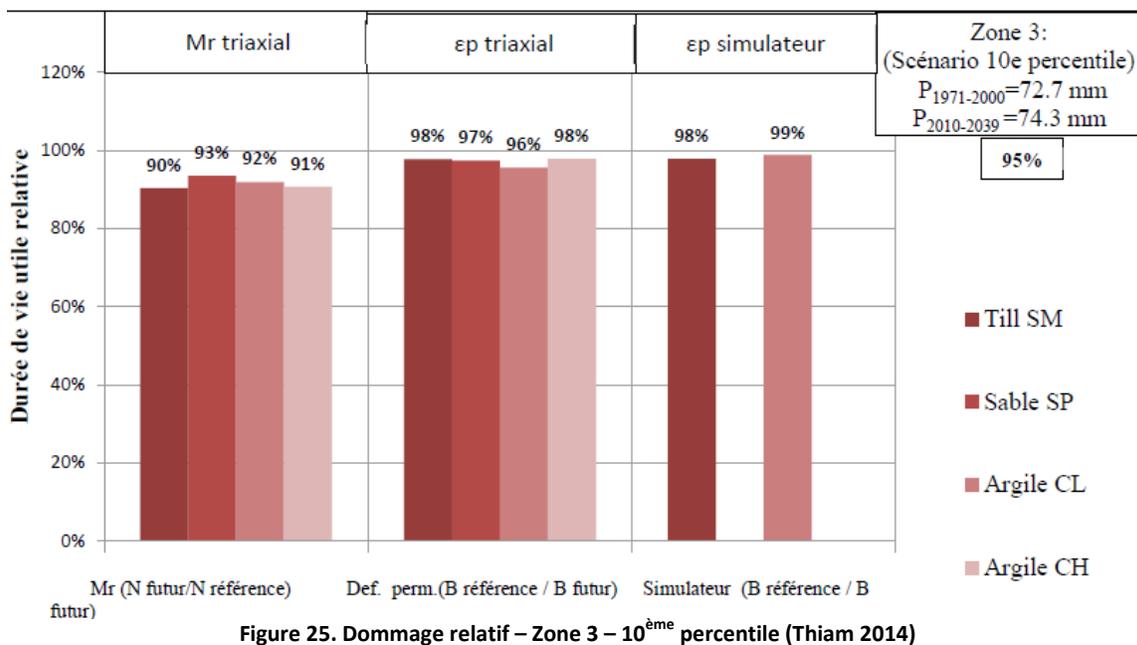
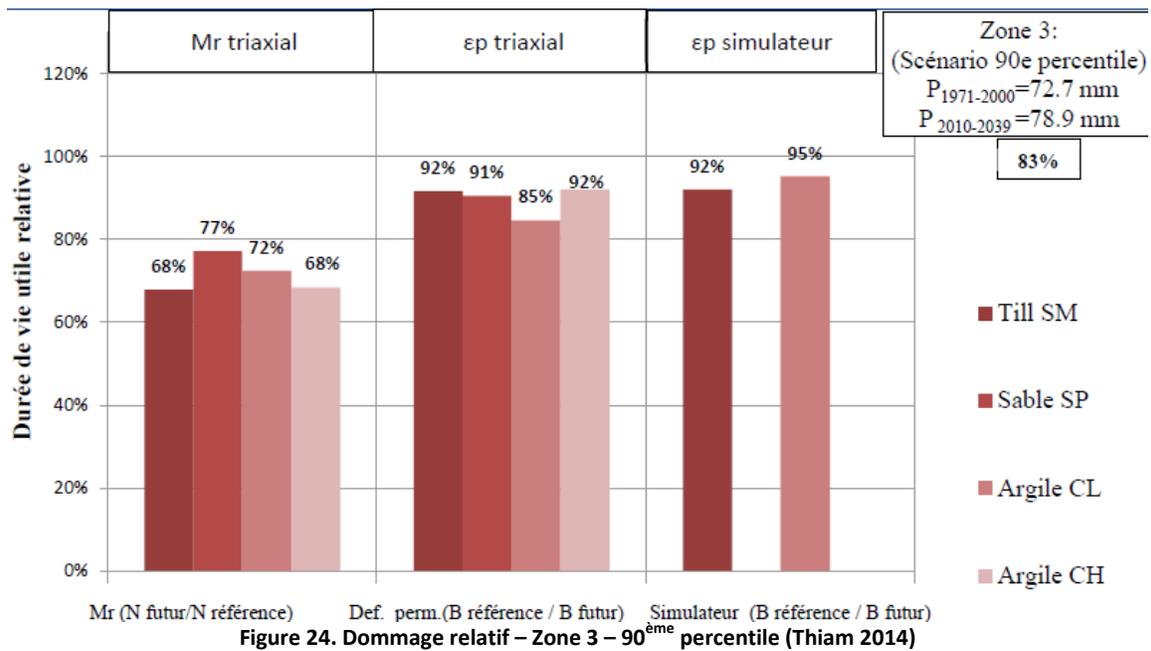


Figure 23. Dommage relatif – Zone 2 – 10<sup>ème</sup> percentile (Thiam 2014)



Plusieurs points peuvent être tirés des figures ci-dessus, notamment :

- Comme l'analyse est basée sur le paramètre B dans le cas de la déformation permanente, les sols qui ont montré une augmentation de ce paramètre avec l'augmentation de la teneur en eau voient leur durée de vie relative augmenter;
- De façon générale, l'analyse par le module réversible donne une plus grande perte de durée de vie;
- La perte de durée de vie en déformation permanente (triaxial et simulateur) est similaire, peu importe le type d'essai considéré;

- Dans la zone 1, dépendamment du scénario considéré, la diminution moyenne de la durée de vie varie entre 1 et 12%;
- Dans la zone 2, dépendamment du scénario considéré, la diminution moyenne de la durée de vie varie entre 0 et 15%;
- Dans la zone 3, dépendamment du scénario considéré, la diminution moyenne de la durée de vie varie entre 5 et 17%;
- Selon certains scénarios, l'augmentation des précipitations prévue pour la période 2010-2039 est si faible qu'il n'y a aucun effet sur la durée de vie;
- L'analyse avec le module réversible montre que le sable SP est le moins sensible à l'augmentation des précipitations, ce n'est cependant pas nécessairement observé en déformation permanente;
- L'analyse avec la déformation permanente (triaxial), montre que l'argile CL est le plus affecté par les changements prévus de régimes de précipitations;
- Selon les deux essais réalisés avec le simulateur de charges roulantes, le sable silteux SM sera plus affecté par l'augmentation prévue des précipitations.

De façon plus générale, les résultats obtenus dans le cadre de ce premier volet montrent, de façon générale, que la performance à long terme des structures de chaussées flexibles est affectée significativement par l'augmentation des précipitations dans un contexte de changements climatiques. En fonction des scénarios, des zones, du type de sol ou de la méthode utilisée pour calculer l'endommagement, la réponse des diverses approches varie entre un effet nul, voire un léger effet bénéfique, jusqu'à une réduction de la durée de vie de 32%.

## ***5.2 Effet de l'augmentation des températures hivernales sur la performance des chaussées flexibles***

---

Tel qu'il a été discuté précédemment, ce projet comporte deux principaux volets. La section précédente a traité d'un des effets appréhendés des changements climatiques, soit l'augmentation des précipitations. La documentation disponible sur les changements climatiques, discutée en introduction à ce rapport, discute que l'augmentation des températures associée à un tel phénomène serait plus importante en hiver au Québec. La performance des chaussées flexibles étant intimement liée aux conditions hivernales, notamment la durée et la sévérité de la période de gel quantifiées par l'indice de gel (IG), il apparaît important d'analyser les effets des changements climatiques dans cette optique.

Le gel est un facteur de dégradation important des chaussées flexibles et la conception des chaussées au Québec est adaptée afin de protéger les infrastructures de transports contre ces effets. Parmi ceux-ci, il est possible d'énumérer : le soulèvement au gel différentiel longitudinal et transversal, la fissuration thermique et l'affaiblissement des chaussées au dégel. La fissuration thermique est une problématique davantage axée sur la formulation des matériaux et le choix des composantes. Cependant, une augmentation des températures hivernales est bénéfique sur ce type d'endommagement. Une augmentation des températures en hiver est aussi susceptible d'avoir un effet bénéfique, car une diminution de la durée/sévérité de cette saison est susceptible d'être associée à une pénétration moins profonde du gel dans la structure de chaussée. Les principaux problèmes associés au comportement au gel des chaussées surviennent lorsque le front de gel atteint un sol d'infrastructure sensible au gel sous la structure de chaussée. Dans un tel contexte, si une source d'eau est présente à proximité et que le sol est gélif, la présence de température négative dans le sol induit des phénomènes provoquant la migration verticale vers le front de gel de l'eau pour alimenter des lentilles de glace en formation. Ce phénomène conduit à des soulèvements de surface qui provoquent la dégradation du profil de surface en hiver et réduisent le niveau de service des chaussées durant la période hivernale. Ainsi, une pénétration moins profonde du gel dans les structures de chaussées est potentiellement bénéfique pour la performance à long terme des chaussées. Il peut alors devenir pertinent, dans un contexte de changements climatiques, d'analyser les intrants associés à la conception au gel des structures et de les adapter à cette nouvelle réalité.

Il est aussi permis de croire que la diminution de la profondeur de gel diminuera les dommages liés à la circulation des charges lourdes en période de dégel. La diminution des soulèvements au gel et des lentilles de glace est bénéfique pour la récupération mécanique des sols d'infrastructure en période de dégel. Cette situation associée à la fin de dégel correspond au cas b) présenté à la Figure 26. Au début du dégel (cas a), la fonte de la neige et de la glace génère une importante quantité d'eau qui tend à s'accumuler entre le front de dégel, plus important au centre de la chaussée, et la couche de revêtement. Cette situation est aussi reconnue comme étant fort dommageable pour les chaussées flexibles, puisque les matériaux granulaires gorgés d'eau risquent d'accumuler davantage de déformations permanentes, alors que la rigidité plus faible de la fondation rend vulnérable l'enrobé bitumineux à la fissuration de fatigue. En effet, au dégel, comme l'enrobé bitumineux est encore relativement froid, fragile et moins flexible, le manque de support structural dû à l'affaiblissement des fondations a pour effet que les déformations en tension à la base du revêtement peuvent devenir importante par rapport à la capacité du matériau dans ces conditions et conduire à une rupture plus rapide par fatigue. Cette condition critique de la chaussée est aussi remplie lors des redoux hivernaux. Une hypothèse avancée dans le cadre de ce projet est que l'augmentation des températures hivernales est susceptible d'être associée à une augmentation du nombre de redoux hivernaux. Les conclusions des diverses études sont cependant mitigées à ce sujet.

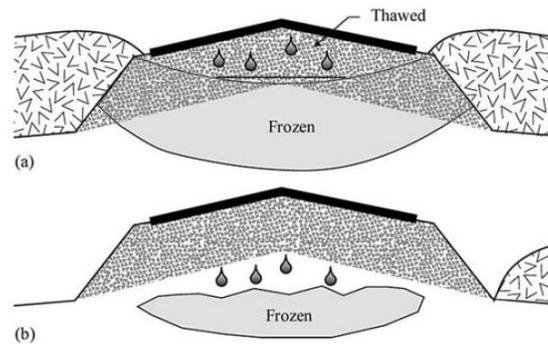


Figure 26. a) Début du dégel; b) Fin du dégel (Doré et Zubeck 2009)

L'analyse réalisée dans cette section est donc orientée sur les effets positifs et négatifs des changements climatiques en ce qui concerne l'augmentation des températures hivernales. Dans un premier temps, il est nécessaire de définir les scénarios d'augmentation des températures hivernales pour le Québec. Au niveau des effets positifs associés aux changements climatiques en hiver, une étude approfondie sera réalisée afin de prédire la tendance de réchauffement des températures hivernales et d'y associer une diminution de l'indice de gel, de la profondeur de gel et des soulèvements au gel. Cette partie de l'étude conduit à une méthodologie pour l'établissement d'un facteur de correction de l'indice de gel. En ce qui concerne les effets négatifs, principalement associés à la situation rencontrée lors des redoux hivernaux, une analyse approfondie sera réalisée afin d'établir une relation entre les conditions hivernales (indice de gel) et les redoux hivernaux à partir de données de stations météorologiques. De plus, des essais et des modélisations seront alors réalisés afin de quantifier l'effet du nombre de redoux hivernaux sur la performance en déformation permanente des matériaux granulaires de fondation de chaussées et sur la performance en fatigue des couches d'enrobés bitumineux.

### 5.2.1 Simulations climatiques pour la période hivernale au Québec et traitement des données climatiques

Dans le cadre de ce volet du projet, l'expertise du consortium Ouranos a été mise à profit afin d'établir des projections climatiques pour la période hivernale au Québec. Du point de vue de la conception des chaussées au gel, l'indice de gel de l'air (IGa) est un intrant climatique important et les simulations climatiques ont été orientées de façon à établir l'évolution de ce paramètre au cours des futures décennies dans un contexte de

changements climatiques. Après avoir défini des paramètres importants pour les modélisations, tels; la date du début de la période de gel et la date de la période de fin de gel, il a été nécessaire de cerner les régions à l'étude. Des documents provenant du MTQ, la carte des zones de dégel (Figure 17) et des indices de gel normal (Figure 27), ainsi que du rapport de Brown et Chaumont (2009) ont été mis à profit. Ce dernier rapport a permis d'obtenir des projections de type delta (Figure 28) à partir de 5 simulations avec le Modèle Régional Climatique Canadien 4 (MRCC4), qui montrent des effets assez uniformes sur l'axe est-ouest et une tendance à l'augmentation dans l'axe nord-sud. La combinaison de l'ensemble de ces informations a permis de définir la carte des régions à l'étude dans ce projet, telle que présentée à la Figure 29. Cette carte est similaire à celle des zones de dégel utilisées par le MTQ, mais la zone 2 a été subdivisée puisque, en se basant sur le rapport de Brown et Chaumont (2009), l'évolution de l'indice de gel différait dans certaines régions, par exemple la Côte-Nord et la péninsule gaspésienne.

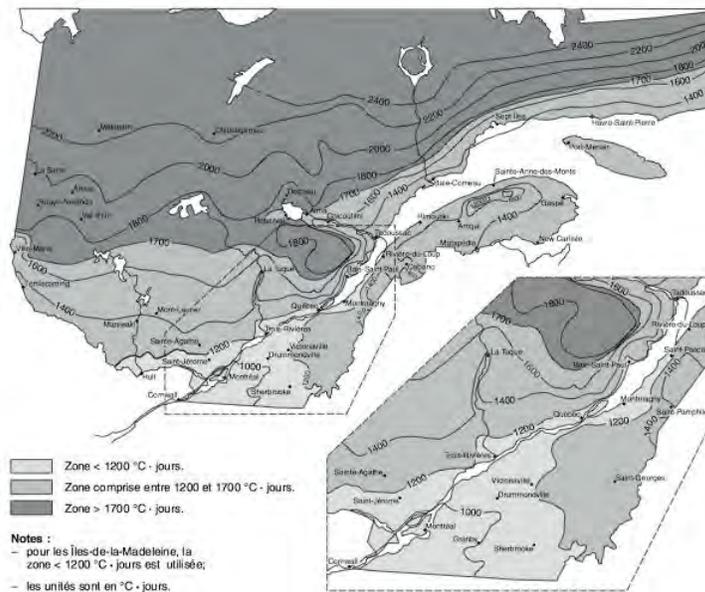


Figure 1.8-1  
Indice de gel normal

Figure 27. Indices de gel normal au Québec (MTQ 2013)

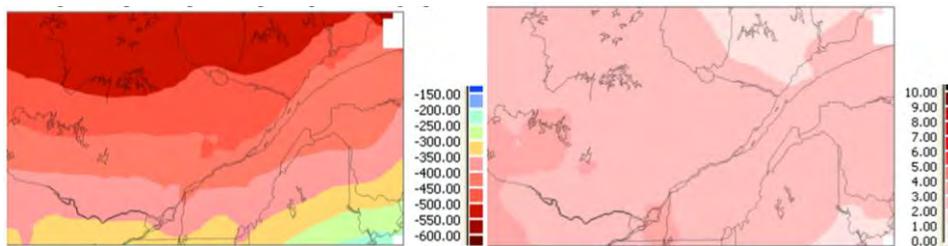


Figure 28. Changements climatiques moyens et écart-type projetés par 5 simulations du MRCC4 (Brown et Chaumont 2009)



**Figure 29. Zones utilisées pour les scénarios climatiques des indices de gel**

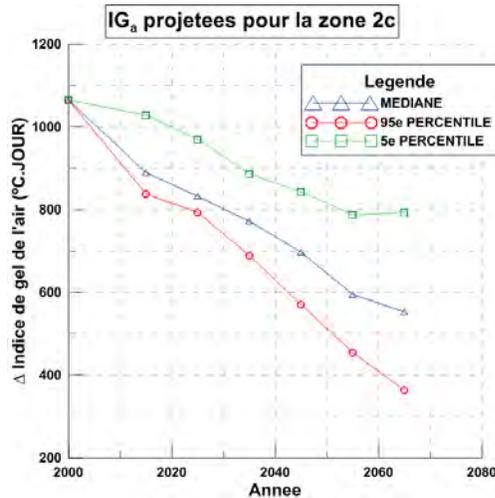
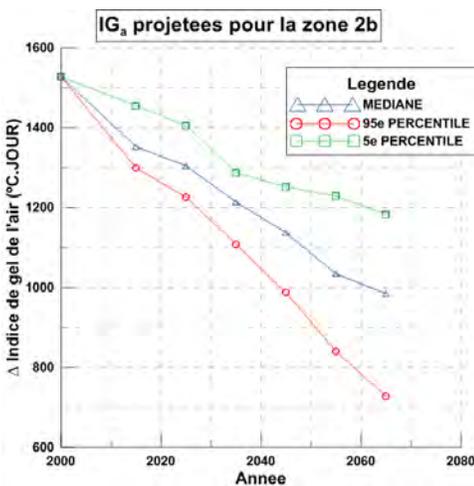
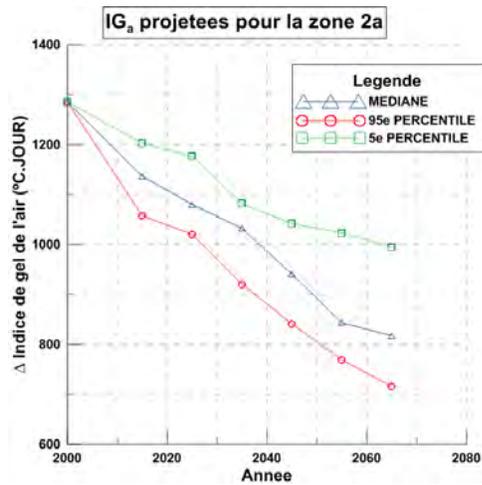
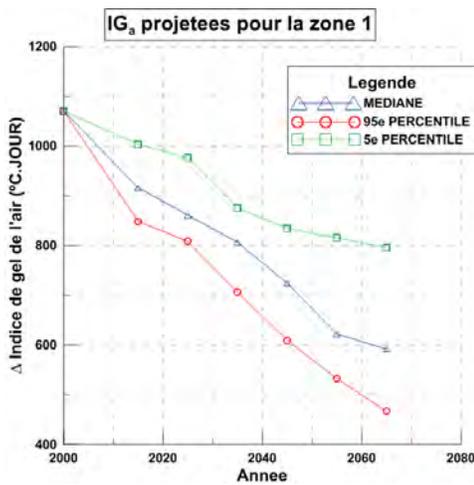
Les simulations climatiques pour la variable IGa, qui est considérée peu complexe à modéliser, ont été réalisées avec des modèles de circulation générale (MCG) qui permettent d'obtenir une précision acceptable dans le cas des zones étudiées, notamment dû à leur grande superficie. Plusieurs modèles, tous variables en termes de domaines, versions, pilotes, et paramétrages physique et chimique, ont été utilisés afin d'obtenir une gamme de futurs possibles. Le Tableau 11 présente un résumé des simulations effectuées en termes de modèles et de leurs diverses composantes. Il est à noter que trois différents scénarios d'augmentation de gaz à effet de serre ont été considérés, soient des scénarios pessimiste (A2), médian (A1B) et optimiste (B1). Les résultats des simulations ont été fournis sous forme de deltas, quantifiant le changement d'indices climatiques par rapport à une période de référence. Cette approche permet de diminuer une partie des erreurs associées au biais. De plus, des moyennes sur des périodes de 30 ans ont été effectuées, encore une fois dans l'objectif de minimiser l'effet des biais et de la variabilité annuelle des indices climatiques.

**Tableau 11. Résumé des simulations climatiques**

MCG	Pays	SRES	Membre
CCMA_CGCM (version 3.1)	Canada	A2, A1B et B1	5
		A2, A1B et B1	1
SCIRO (version mk 3.5)	Australie	A2, A1B et B1	1
MPI_ECHAM (version 5)	Allemagne	1B	1

Tout comme dans le volet 1, la période de référence a été définie à 1971-2000. Dans le cas de ce deuxième volet, les simulations climatiques ont été effectuées sur 6 périodes de 30 ans, toutes séparées par des intervalles de 10 ans (2001-2030, 2011-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051-2080). Un total de 660 simulations a été effectué pour chacune des zones et chacun des horizons climatiques. Les deltas obtenus de ces simulations sont tous négatifs, montrant un adoucissement des hivers dans le futur. Ces valeurs de deltas ont été appliquées à des

valeurs médianes de IG<sub>a</sub> fournies par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Ces valeurs sont de 1070, 1285, 1527, 1065 et 2004 °C\*j pour les zones 1, 2a, 2b, 2c et 3, respectivement. La Figure 30 présente l'exemple de l'évolution de l'indice de gel de l'air médian, ainsi qu'au 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentile, pour les zones à l'étude en appliquant les deltas obtenus des simulations climatiques à l'indice de gel de référence pour cette zone. En prenant l'exemple de cette zone, selon les scénarios considérés (médiane, 5<sup>ème</sup> ou 95<sup>ème</sup> percentile), l'indice de gel est susceptible de diminuer de 26 à 56 % à l'horizon 2051-2080. L'horizon climatique 2011-2040 présente un intérêt dans le cadre de ce projet, car l'environnement bâti actuel sera confronté aux changements climatiques principalement dans cette période. L'indice de gel médian pour cette période est de 861 °C\*j, soit une diminution de 19,5% par rapport à la période de référence. Pour cet horizon et pour l'ensemble des zones, ce sont des réductions de IG<sub>a</sub> allant de 7% à 25% qui sont appréhendées selon les simulations réalisées.



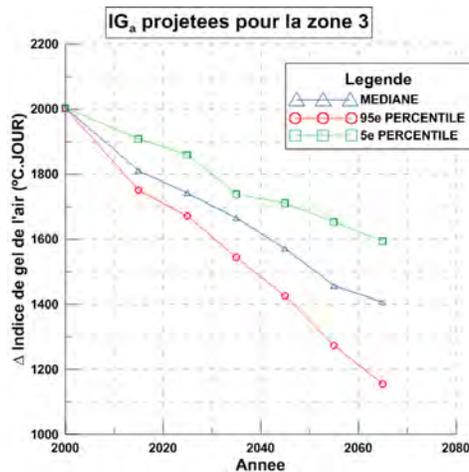


Figure 30. Indices de gel projetés jusqu'à la période 2051-2080 pour les zones à l'étude

Les graphiques présentés à la Figure 30 semblent présenter une tendance linéaire d'évolution de l'indice de gel de l'air avec les périodes. Afin d'être utilisable dans le cadre du projet, la variation de l'indice de gel de l'air avec le temps doit être traduite mathématiquement. Des droites de tendance linéaire ont été utilisées pour les scénarios médians, 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentile, et des coefficients de détermination variant 0,986 et 0,999 ont été obtenus, ce qui montre que la droite de régression linéaire convient pour représenter le phénomène. Le Tableau 12 le résultat de l'ensemble des régressions linéaires réalisées entre  $\Delta IG_a$  et le temps. Par mesure de simplification, l'échelle de temps a été mise à zéro. En regardant les données médianes, il est possible de constater que la pente de variation de l'indice de gel en fonction du temps varie de  $-7,6$  à  $-9,7$  °C\*j/an, la zone 3 étant la plus affectée sur cet aspect. L'utilité de ces courbes sera importante pour l'établissement d'un facteur de correction de l'indice de gel pour prendre en compte les changements climatiques.

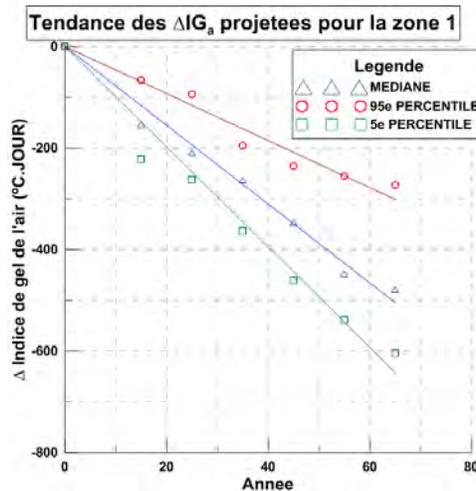


Figure 31. Variation de l'indice de gel de l'air –modélisation par régression linéaire (Zone 1)

Tableau 12. Équation de régression entre ΔIGa et le temps

Zone	Médiane		95 <sup>e</sup> percentile		5 <sup>e</sup> percentile	
	Équation	R <sup>2</sup>	Équation	R <sup>2</sup>	Équation	R <sup>2</sup>
1	Y = -7.764 X	0,996	Y = -4.636 X	0,988	Y = -9.883 X	0,993
2a	Y = -7.610 X	0,996	Y = -4.863 X	0,990	Y = -9.529 X	0,989
2b	Y = -8.729 X	0,997	Y = -5.608 X	0,991	Y = -12.305 X	0,999
2c	Y = -8.317 X	0,995	Y = -4.586 X	0,986	Y = -10.992 X	0,997
3	Y = -9.656 X	0,996	Y = -6.462 X	0,996	Y = -13.179 X	0,998

### 5.2.1.1 Corrélation entre les IGa et le nombre de redoux hivernaux

L'un des effets appréhendés des changements climatiques est l'augmentation du nombre de redoux hivernaux avec la diminution de l'indice de gel de l'air. Cet aspect du volet est très complexe à évaluer, car il est influencé par de nombreux paramètres climatiques. L'approche préconisée dans le cadre de ce projet est d'établir une corrélation entre IGa et le nombre de redoux hivernaux. Il est supposé que plus les IGa sont faibles, plus les températures moyennes quotidiennes sont susceptibles d'osciller autour de 0 °C. Pour arriver à faire cette démarche, la première étape est de déterminer un indice de dégel significatif qui provoquerait le dégel d'une partie suffisante de la fondation (10 cm) pour altérer le comportement de la chaussée. Cette évaluation a été faite par l'analyse de données de stations météo routières (26) du MTQ et par analyse par la méthode des éléments finis (logiciel TEMP). La Figure 32 présente les résultats de ces analyses. Par l'analyse des stations météo routières, un indice de dégel de l'air IDa de 7,4 °C\*j est nécessaire pour dégeler 30 cm de chaussée (enrobé + 10 cm dans la fondation). Par éléments finis, la figure montre des conditions thermiques stables à 60 jours de gel. À ce moment, une température de surface de 5 °C est appliquée et 2,67 jours sont nécessaires pour atteindre une profondeur de 30 cm dans la chaussée modélisée. Ceci équivaut à un indice de dégel de surface ID<sub>s</sub> de 13 °C\*j. En ingénierie des chaussées, ID<sub>s</sub> peut être converti en IDa par le facteur n, correspondant à 1,85 dans ce cas (Doré et Zubeck 2009). Ceci permet d'obtenir, par la méthode des éléments finis, un indice de dégel de l'air significatif de 7,2 °C\*j, en accord avec l'analyse réalisée avec les stations météo routières.

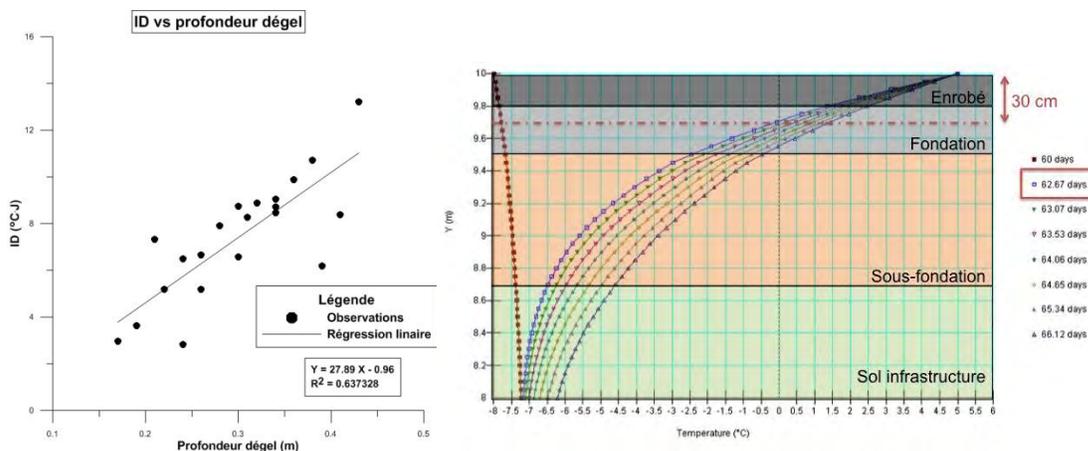


Figure 32. Résultats pour l'étude de l'indice de dégel significatif : Gauche) Étude des stations météo routière; Droite) Modélisation par éléments finis

L'obtention de la valeur de IDa de 7 °C\*j est importante, car il est maintenant possible d'étudier les données de stations météorologiques et d'analyser le nombre de redoux hivernaux s'étant produit pour des régions données qui sont caractérisées par des données climatiques types, notamment des indices de gel. Pour les besoins de l'analyse, un redoux hivernal est une période où l'indice de dégel est supérieur à 7 °C\*j et celui-ci doit être suivi

d'une période de gel. Un total de 526 hivers associés à l'ensemble des zones étudiées a été analysé, pour des indices de gel variant de 625 à 3084 °C\*j. La Figure 33 présente les résultats de cette analyse. Les données de IGa de chaque station ont été regroupées avec le nombre de redoux hivernaux correspondant mesuré lors de l'analyse des données climatiques. Pour chaque nombre de redoux hivernal, la médiane des indices de gel associés a été extraite pour tracer la relation. Il est possible d'observer une variabilité importante des données, témoignant du très grand nombre de variables pouvant avoir un effet sur l'avènement d'un épisode de redoux hivernal. Dans un tel contexte, un coefficient de détermination de 0,6 est considéré acceptable. L'équation associant l'indice de gel au nombre de redoux  $Nb_{rdx}$  est définie

$$IGa = -50,46Nb_{rdx} + 1340,5 \quad (15)$$

dans laquelle IGa est l'indice de gel en °C\*j. Cette équation propose que, par exemple, une région subissant un IGa de 1341 °C\*j ne subira aucun redoux hivernal, alors qu'une autre subissant un IGa de 1200 °C\*j sera soumise à trois épisodes de redoux. L'analyse de ces données a aussi permis d'établir que la durée médiane d'un redoux hivernal est de 5 jours et que la fin de l'hiver (mars-avril) est la période où le plus grand nombre de redoux hivernaux se produit.

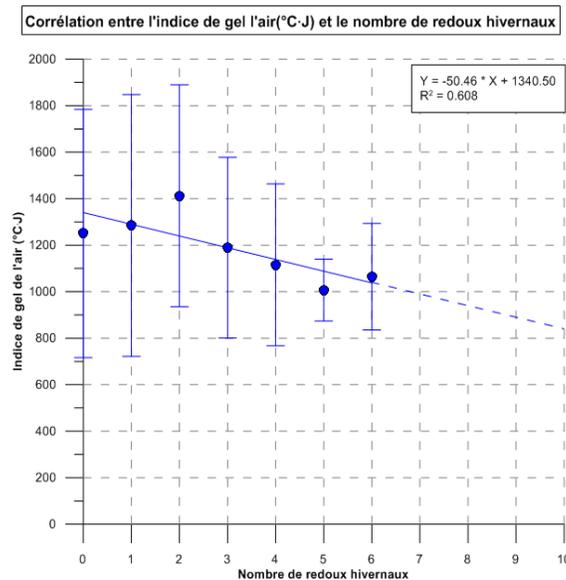


Figure 33. Corrélation entre les indices de gel médians et le nombre de redoux hivernaux

Comme cette démarche a permis de proposer une méthode d'estimation du nombre de redoux hivernaux en fonction de l'indice de gel de l'air, le jumelage de celle-ci avec les résultats des simulations climatiques dans un contexte de changements climatiques permet de quantifier le nombre et l'augmentation des redoux hivernaux pour chacune des zones étudiées en fonction de l'évolution de l'indice de gel de l'air. Selon les données disponibles pour la période de référence (1971-2000), seules les zones 1 et 2c, qui montrent des indices de gel de l'air inférieurs à 1341 °C\*j, subissent des épisodes de redoux (5). Le Tableau 13 montre le nombre de redoux hivernaux appréhendés dû aux changements climatiques pour chaque zone pour la période 2011-2040 en fonction des scénarios considérés. Il est possible de constater, en analysant le cas médian, que la zone 3 ne subira aucun redoux hivernal pour cette période, car le climat demeurera trop froid. Cependant, les zones 2a et 2b subiraient des épisodes de redoux dû aux changements climatiques. La Figure 34 présente un exemple de la projection du nombre de redoux en fonction du temps pour la zone 1, qui est expliquée par la diminution de l'indice de gel de l'air. Ainsi, pour chacune des zones étudiées, une relation de ce type peut être obtenue. Les tendances générales d'évolution peuvent être plus ou moins importantes, voire nulle en prenant l'exemple du cas médian de la zone 3, mais témoignent d'une évolution du climat dans le futur propre à chaque région.

Tableau 13. Nombre de redoux hivernaux attendus pour la période 2011-2040

Zone	Horizon 2011-2040		
	Médiane	95e percentile	5e percentile
1	10	7	11
2a	5	3	6
2b	1	0	2
2c	10	7	11
3	0	0	0

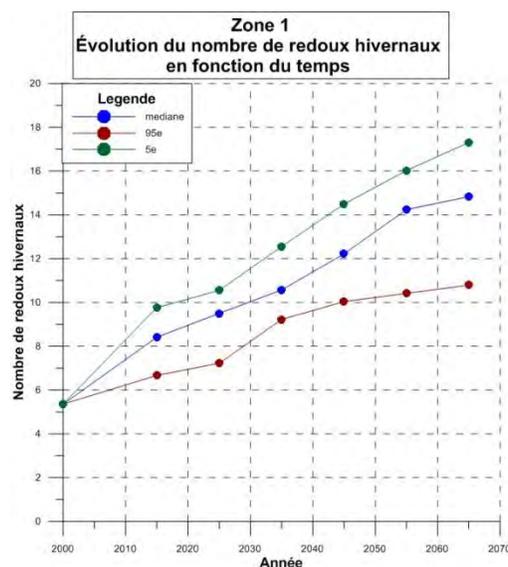


Figure 34. Nombre de redoux hivernaux projetés en fonction de l'indice de gel de l'air

## 5.2.2 Méthodologie de correction pour les indices de gel de l'air et quantification des effets positifs

L'indice de gel de l'air est un paramètre pour le dimensionnement des structures de chaussées au gel. Il est utile pour la détermination de l'épaisseur des couches de chaussées afin d'ajuster le temps passé par le front de gel dans les sols d'infrastructures, souvent gélifs. Le MTQ utilise l'indice de gel moyen, ajusté en fonction d'une période de récurrence choisie, compilé à partir des données de plusieurs stations météorologiques. Tel qu'il a été discuté dans les sections précédentes, une diminution de l'indice de gel de l'air est prévue au cours des prochaines décennies due aux changements climatiques. Ainsi, d'un point de vue de conception, cette valeur doit être considérée comme évoluant dans le temps. Il est donc pertinent de réfléchir dans le cadre de ce projet à une approche permettant de bien prendre en compte la diminution de la rigueur des hivers.

Le logiciel de dimensionnement des chaussées flexibles utilisé par le MTQ, CHAUSSÉE2, a été utilisé pour cette partie de l'étude. Ce logiciel permet de faire la conception structurale d'une chaussée flexible basée sur la méthode AASHTO 1993 (AASHTO 1993), de faire la conception au gel, en termes d'épaisseur totale, basée sur un calcul du bilan de chaleur au front de gel (méthode de Saarelainen) et du soulèvement associé par la méthode de Konrad (Saint-Laurent 2006). Ce logiciel a été utilisé pour évaluer l'évolution de la profondeur de gel, et du

soulèvement associé, en fonction des années. Cette évolution est due aux changements de  $IG_a$  dû aux changements climatiques. Ces modélisations ont été réalisées pour trois types de routes (nationale – 30 ans – 5MÉCAS, régionale – 25 ans 2 MÉCAS et collectrice – 25 ans – 0,5 MÉCAS) et trois types de sols (argile de faible plasticité CL, mélange gravier-sable-silt-argile GC-GM et un sable silteux contenant plus de 30 % de particules fines SM). Ces sols sont caractérisés par un module réversible propre à chaque type, mais aussi des propriétés thermiques différentes (conductivité thermique gelé et non gelé). Ils présentent aussi chacun des indices de gélivité différents. L'indice de gélivité utilisé s'appelle le potentiel de ségrégation  $SP_0$  et représente la susceptibilité d'un sol à former des lentilles de glace. La valeur de  $SP_0$  pour le CL est de  $5 \text{ mm}^2/(\text{K}\cdot\text{h})$ , de  $4 \text{ mm}^2/(\text{K}\cdot\text{h})$  pour le SM et de  $2 \text{ mm}^2/(\text{K}\cdot\text{h})$  pour le GC-GM. Il est doit être noté que le processus de conception au gel selon la méthode du MTQ prévoit un soulèvement admissible de 55 mm pour une route nationale, 60 mm pour une route régionale et 70 mm pour une route locale. Le Tableau 14 présente les  $IG_a$  initiaux utilisés pour les modélisations. Les  $IG_a$  de la période de référence ont été ajustés pour l'année 2010 à l'aide des simulations climatiques. Ceci permet alors d'effectuer des travaux de modélisation avec le logiciel CHAUSSÉE2, comme il est présenté au Tableau 15, avec comme point de départ l'année 2010. Ce Tableau présente l'épaisseur des couches d'enrobé bitumineux, de fondation et de sous-fondation, déterminée à l'aide du logiciel CHAUSSÉE2 pour rencontrer les exigences structurales liées au trafic modélisé (exprimé en MÉCAS) et aux conditions climatiques (associées à l'indice de gel de l'air). De façon générale, plus le sol est gélif ( $SP_0$  élevé) ou plus l'importance de la route augmente (soulèvement admissible diminue), plus l'épaisseur totale tend à augmenter. Ceci se répercute au niveau de l'épaisseur de la sous-fondation.

**Tableau 14.  $IG_a$  initiaux pour la détermination du facteur de correction**

<b>Zone</b>	<b><math>IG_a</math> 1971-2000 °C·J</b>	<b><math>IG_a</math> 2010 °C·J</b>
1	1070	992
2	1240	1158
3	2004	1907

Tableau 15. Épaisseur des couches en fonction du type de route et de sol pour l'année 2010

Sol	Route	Couche	Zone1 Épaisseur (mm)	Zone 2 Épaisseur (mm)	Zone 3 Épaisseur (mm)
CL	Nationale	E.B.		170	
		MG-20		250	
		MG-112	850	1 025	1725
	Régionale	E.B.		130	
		MG-20		225	
		MG-112	875	1 050	1725
Locale	E.B.		90		
	MG-20		200		
	MG-112	825	1 000	1650	
SM	Nationale	E.B.		170	
		MG-20		250	
		MG-112	300	300	700
	Régionale	E.B.		130	
		MG-20		225	
		MG-112	300	300	650
Locale	E.B.		90		
	MG-20		200		
	MG-112	300	300	450	
GC-GM	Nationale	B.B.		170	
		MG-20		250	
		MG-112	300	300	300
	Régionale	E.B.		130	
		MG-20		225	
		MG-112	300	300	300
Locale	E.B.		90		
	MG-20		200		
	MG-112	300	300	300	

Le logiciel CHAUSSÉE2 a donc été utilisé en abaissant progressivement l'indice de gel de l'air, ce qui a permis de noter pour chaque simulation une évolution de la profondeur de gel et du soulèvement au gel. La Figure 35 présente des exemples de résultats obtenus pour les simulations réalisées en considérant des routes régionales. Comme un indice de gel décroissant, suivant les résultats des simulations climatiques, a été appliqué dans le logiciel, la profondeur de gel et le soulèvement au gel correspondant tendent à diminuer en fonction du temps. Ces relations suivent une tendance linéaire.

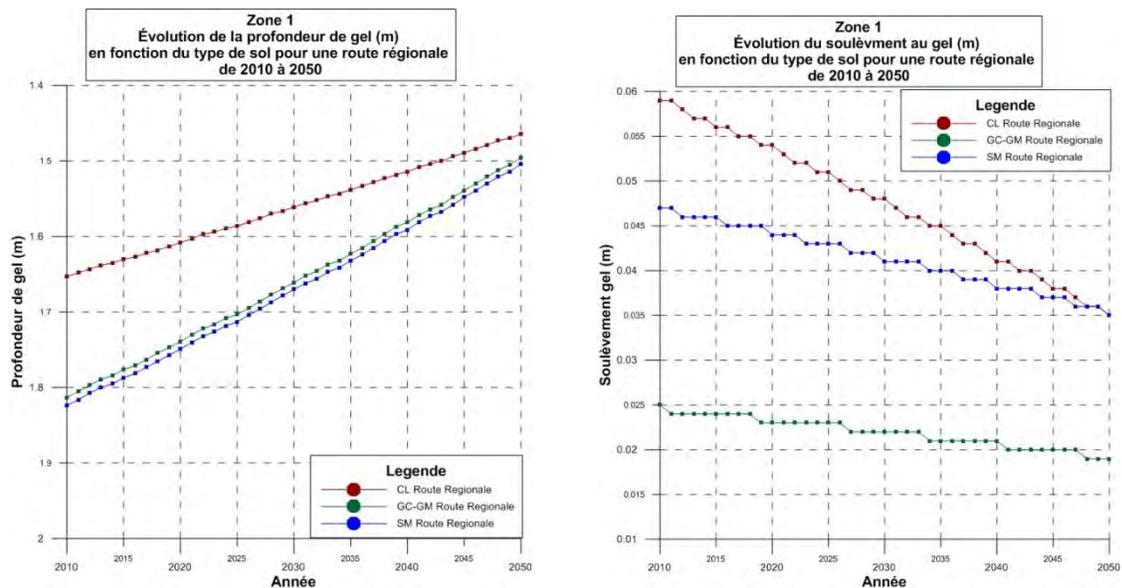


Figure 35. Évolution de la profondeur de gel (gauche) et du soulèvement au gel (droite) en fonction du temps et du type de sol pour une route régionale pour la période 2010-2050

Le soulèvement au gel est un facteur important de dégradation des chaussées en contexte climatique nordique. La diminution annuelle du soulèvement appréhendé dû aux effets des changements climatiques est donc potentiellement bénéfique pour la performance des chaussées au Québec. L'indicateur de performance globale d'une chaussée typiquement utilisé est l'Indice de Rugosité Internationale (IRI), exprimé en m/km, qui quantifie le confort au roulement de la surface de la chaussée. Plus cet indice est élevé, plus le niveau de service de la surface est déficient. Cet indice est influencé par l'ensemble des distorsions, déformations et fissures présent en surface de la chaussée. Une chaussée nouvellement construite présente généralement un IRI très bas, et celui-ci tend à augmenter en fonction du temps au fur et à mesure que la dégradation de la chaussée progresse. Doré et Zubeck (2009) ont compilé des données montrant que le taux de variation de l'IRI (m/km/an) est fonction du soulèvement au gel subi par une chaussée, tel que présenté à la Figure 36. Cette relation est difficile à définir, car le soulèvement au gel n'est pas un facteur unique contribuant à la dégradation de l'IRI. Il est possible de mentionner d'autres phénomènes comme la fissuration transversale et le soulèvement au gel des fissures (soulèvements au gel superficiels). En prenant en considération ce fait, le coefficient de corrélation semble raisonnable (0,553). Cette relation est aussi le seul outil du genre disponible dans la littérature. La relation liant le soulèvement au gel  $h$  (mm) au taux de variation de l'IRI est

$$\Delta IRI = 0,0017h + 0,0297 \quad (16)$$

dans laquelle  $\Delta IRI$  est exprimé en m/km/an. Cette relation linéaire entre  $\Delta IRI$  et  $h$  a été combinée aux résultats montrant la diminution du soulèvement au gel en fonction du temps pour la période 2010-2050 tel que présenté précédemment. La Figure 37 présente un exemple de cette conversion pour les routes régionales de la zone 1 et les trois types de sols. Comme les valeurs de  $\Delta IRI$  et  $h$  suivent une relation linéaire, ces relations entre  $\Delta IRI$  et le temps sont en tous points similaires à celles reliant  $h$  et le temps.

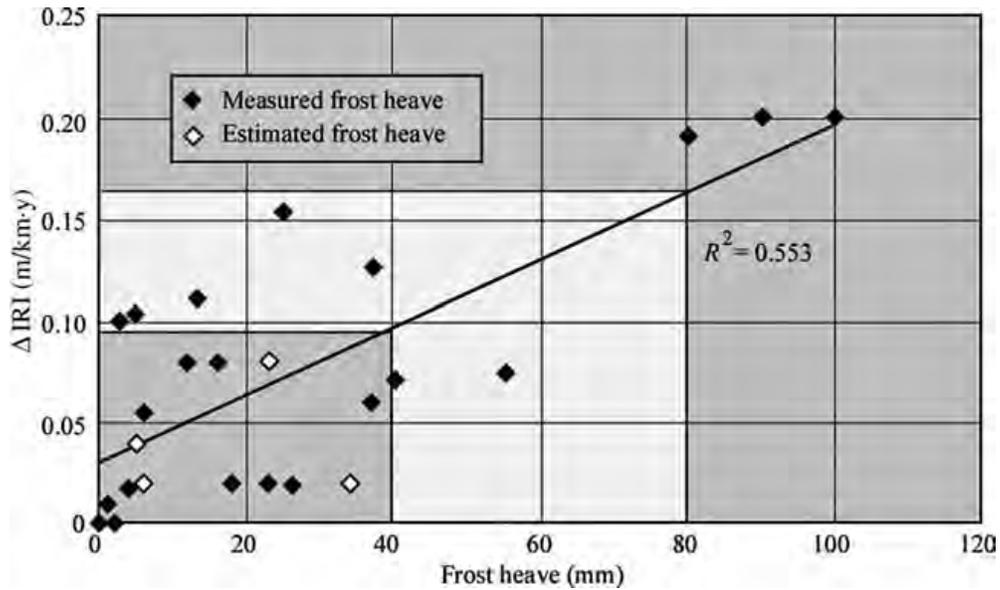


Figure 36. Relation entre le taux de variation de l'IRI et le soulèvement au gel (Doré et Zubeck 2009)

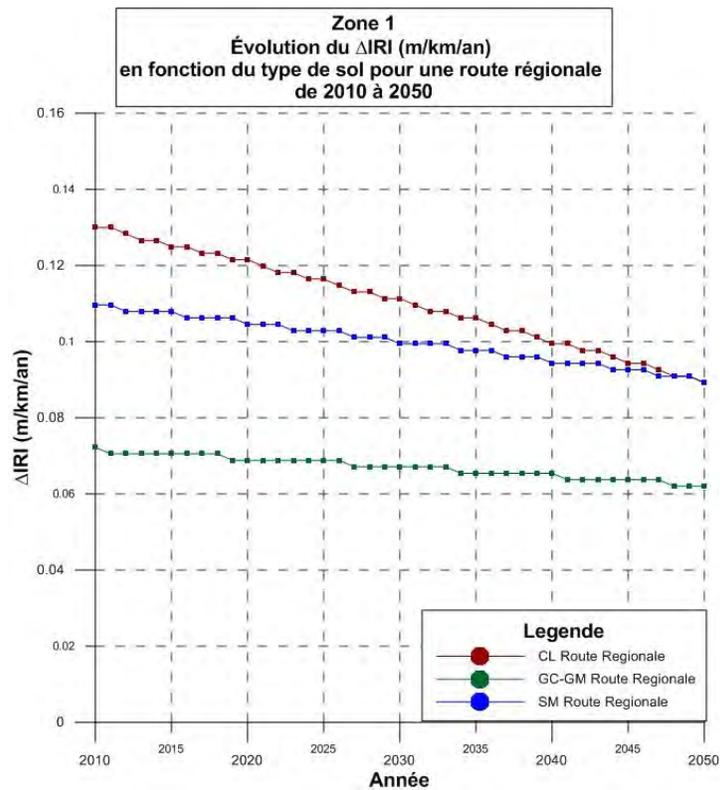


Figure 37. Évolution de  $\Delta IRI$  en fonction du temps des routes régionales pour la zone 1 et pour différents sols

Afin de prendre en considération la valeur mobile de l'indice de gel dans le temps, l'avenue proposée est d'utiliser l'indice de gel moyen (IGmoy) de l'air qui sera prévu à la moitié de la période de conception. Ainsi, lors d'une

conception de chaussée, il est suggéré de prendre l'indice de gel de l'année de conception et d'y soustraire une variation d'indice de gel ajustée en fonction la moitié de la période de conception selon

$$IG_{moy} = IG_{ref} - \Delta IG_a \quad (17)$$

$$\Delta IG_a = (A_a - A_r) m + \frac{(n * m)}{2} \quad (18)$$

dans lesquelles  $IG_{ref}$  est l'indice de gel de la période de référence,  $\Delta IG_a$  est le changement de l'indice de gel de l'air attendu à l'année coïncidant avec la moitié de la durée de vie utile de la chaussée,  $A_a$  est l'année actuelle de conception,  $A_r$  est l'année de l'indice de gel référence,  $m$  est la pente de l'évolution de l'indice de gel et  $n$  est la durée de vie prévue de la chaussée dimensionnée. Cette méthode a été appliquée au dimensionnement des chaussées considérées dans cette section, soient les routes nationales (30 ans), régionales (25 ans) et collectrices (25 ans), construites sur des sols de type CL, SM et GC-GM, et pour des trafics de 5, 2 et 0,5 MÉCAS respectivement. Le Tableau 16 présente les résultats obtenus avec CHAUSSÉE2 en utilisant le  $IG_a$  de la période référence et le  $IG_a$  corrigé selon la méthode proposée. Pour le dimensionnement avec le  $IG_a$  corrigé, le soulèvement moyen  $h_{moy}$ , obtenu à la moitié de la durée de vie, est indiqué. Comme dans certains cas, la diminution de l'indice de gel de l'air entraîne une diminution de l'épaisseur de la structure, le gain en économie de matériaux (dû à une diminution de l'épaisseur de la sous-fondation  $\Delta SF$ ) est aussi présenté. Il est donc possible de constater qu'une économie potentielle est réalisée si la chaussée est construite sur un sol gélif (CL). Lorsqu'un dimensionnement sur sol peu gélif est considéré (GC-GM), les soulèvements prévus sont bien en dessous du seuil maximal et l'épaisseur de la sous-fondation est gouvernée par le dimensionnement structural et non celui au gel. Dans les simulations montrant les diminutions de l'épaisseur de sous-fondation les plus importantes, un gain en économie de matériaux de 1,125 \$/m<sup>2</sup> peut être envisagé.

Tableau 16. Épaisseur de la protection contre le gel en fonction de l'indice de gel de l'air utilisé

Zone	Sol	Type route	SF IG <sub>a</sub> (mm)	h (m)	SF IG <sub>a</sub> corrigé (mm)	h <sub>moy</sub> (m)	ΔSF (mm)	Gain (\$/m <sup>2</sup> )
1	CL	Nationale	850	0,055	725	0,055	125	1,125
		Régionale	875	0,059	775	0,059	100	0,900
		Locale	825	0,070	725	0,070	100	0,900
	SM	Nationale	300	0,048	300	0,044	0	0
		Régionale	300	0,051	300	0,048	0	0
		Locale	300	0,055	300	0,052	0	0
	GC-GM	Nationale	300	0,022	300	0,021	0	0
		Régionale	300	0,024	300	0,023	0	0
		Locale	300	0,026	300	0,025	0	0
2	CL	Nationale	1025	0,055	900	0,055	125	1,125
		Régionale	1050	0,060	950	0,060	100	0,900
		Locale	1000	0,070	900	0,070	100	0,900
	SM	Nationale	300	0,053	300	0,049	0	0
		Régionale	300	0,056	300	0,053	0	0
		Locale	300	0,060	300	0,057	0	0
	GC-GM	Nationale	300	0,025	300	0,023	0	0
		Régionale	300	0,027	300	0,025	0	0
		Locale	300	0,028	300	0,027	0	0
3	CL	Nationale	1725	0,055	1625	0,055	100	0,900
		Régionale	1725	0,060	1650	0,060	75	0,675
		Locale	1650	0,069	1575	0,069	75	0,675
	SM	Nationale	675	0,055	600	0,055	75	0,675
		Régionale	625	0,060	550	0,060	75	0,675
		Locale	450	0,070	375	0,070	75	0,675
	GC-GM	Nationale	300	0,032	300	0,031	0	0
		Régionale	300	0,034	300	0,033	0	0
		Locale	300	0,035	300	0,034	0	0

Les résultats de ces modélisations peuvent aussi être interprétés en termes d'endommagement, quantifié par l'IRI. La relation entre le soulèvement au gel et l'IRI a été exploitée à cet effet. Les cas considérés sont exactement similaires. Pour les cas considérant un IG<sub>a</sub> non corrigé, le ΔIRI (m/km/an) a été sommé pour chaque année de la période de conception. Pour les cas considérant un indice de gel corrigé, le soulèvement moyen à la moitié de la période de conception a été utilisé pour trouver le ΔIRI<sub>moy</sub> représentatif. Les résultats de cette analyse sont synthétisés aux Tableau 17, Tableau 18 et Tableau 19. La comparaison entre le cas de référence et celui considérant une correction de l'indice de gel de l'air est réalisée à l'aide d'un ratio

$$Ratio (\%) = 100 \times \frac{\sum \Delta IRI_{IGa}}{\sum \Delta IRI_{IGa \text{ moy}}} \quad (19)$$

La sommation des ΔIRI sur une période de conception permet de calculer l'endommagement total. Un ratio supérieur à 100% indique un effet positif de la diminution de l'indice de gel de l'air sur la performance des chaussées flexibles et vice-versa. Ainsi, en prenant l'exemple de la zone 1, il est possible de constater que l'utilisation d'un indice de gel corrigé provoque une diminution de la durée de vie. Pour les trois zones, la diminution de la durée de vie pour les routes construites sur des sols de types CL de 93 à 97%. En valeur absolue, cet écart est assez petit, car il correspond à environ 0,2 m/km. Les autres cas, sur sols moins gélifs, montrent une légère augmentation (de l'ordre de 3 à 4%) de la durée de vie pour tous les types de sols. Ainsi, l'endommagement total est très similaire, et il est donc possible de penser que la méthode proposée est cohérente.

**Tableau 17. Comparaison de l'endommagement total par dégradation de l'IRI pour en considérant le IGa normal et celui corrigé (zone1)**

Sol	Type route	Durée (ans)	IG <sub>a</sub>		IG <sub>a</sub> corrigé				Ratio %	
			ΣΔIRI (m/km)		IG <sub>a</sub> cor (°C.J)	ΔIRI <sub>moy</sub> (m/km/an)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)		
CL	Nationale	30	3,347		876	0,123	3,696		90,6	93,32
	Régionale	25	3,071	3,315	899	0,130	3,250	3,555	94,5	
	Locale	25	3,528		899	0,149	3,718		94,9	
SM	Nationale	30	3,212		876	0,105	3,135		102,5	103,07
	Régionale	25	2,885	3,047	899	0,111	2,783	2,957	103,7	
	Locale	25	3,043		899	0,118	2,953		103,1	
GC-GM	Nationale	30	2,024		876	0,065	1,962		103,2	103,50
	Régionale	25	1,787	1,893	899	0,069	1,720	1,829	103,9	
	Locale	25	1,867		899	0,072	1,805		103,4	

**Tableau 18. Comparaison de l'endommagement total par dégradation de l'IRI pour en considérant le IGa normal et celui corrigé (zone 2)**

Sol	Type route	Durée (ans)	IG <sub>a</sub>		IG <sub>a</sub> corrigé				Ratio %	
			ΣΔIRI (m/km)		IG <sub>moy</sub> (°C.J)	ΔIRI <sub>moy</sub> (m/km/an)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)		
CL	Nationale	30	3,374		1035	0,123	3,696		91,3	93,08
	Régionale	25	3,077	3,321	1059	0,132	3,293	3,569	93,5	
	Locale	25	3,513		1059	0,149	3,718		94,5	
SM	Nationale	30	3,493		1035	0,113	3,390		103,0	103,61
	Régionale	25	3,125	3,297	1059	0,120	2,995	3,183	104,3	
	Locale	25	3,275		1059	0,127	3,165		122,2	
GC-GM	Nationale	30	2,148		1035	0,069	2,064		104,1	104,28
	Régionale	25	1,893	2,002	1059	0,072	1,805	1,920	104,8	
	Locale	25	1,964		1059	0,076	1,890		103,9	

**Tableau 19. Comparaison de l'endommagement total par dégradation de l'IRI pour en considérant le IGa normal et celui corrigé (zone 3)**

Sol	Type route	Durée (ans)	IG <sub>a</sub>		IG <sub>a</sub> corrigé				Ratio %	
			ΣΔIRI (m/km)		IG <sub>moy</sub> (°C.J)	ΔIRI <sub>moy</sub> (m/km/an)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)	ΣΔIRI <sub>moy</sub> (m/km)		
CL	Nationale	30	3,505		1763	0,123	3,696		94,8	97,02
	Régionale	25	3,207	3,448	1792	0,132	3,293	3,555	97,4	
	Locale	25	3,632		1792	0,147	3,675		98,8	
SM	Nationale	30	3,615		1763	0,123	3,696		97,8	99,24
	Régionale	25	3,266	3,542	1792	0,132	3,293	3,569	99,2	
	Locale	25	3,744		1792	0,149	3,718		100,7	
GC-GM	Nationale	30	2,536		1763	0,082	2,472		102,6	103,23
	Régionale	25	2,209	2,341	1792	0,086	2,145	2,268	103,0	
	Locale	25	2,278		1792	0,088	2,188		104,2	

### 5.2.3 Effet du nombre de redoux hivernaux sur la durée de vie des chaussées et quantification des effets négatifs

---

Il a préalablement été exposé dans ce rapport que l'augmentation des températures hivernales est susceptible d'être associée à une augmentation du nombre de redoux hivernaux. Tel qu'il a été expliqué, les redoux hivernaux provoquent le dégel partiel de la partie supérieure de la fondation granulaire. Ce type d'événement se produit, selon les résultats exposés dans ce rapport, lorsqu'un indice de dégel de  $7^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$  se produit et que celui-ci est suivi d'une période de gel. Les épisodes de redoux hivernaux sont critiques en termes de performance des chaussées, car la fonte partielle de la glace et de la neige produit une quantité importante d'eau qui s'accumule dans la partie supérieure de la fondation et qui se retrouve coincée entre le front de dégel et l'enrobé bitumineux. Ces conditions, combinées aux passages répétitifs des véhicules lourds, sont particulièrement problématiques pour le comportement mécanique de la partie supérieure de la chaussée. L'augmentation des teneurs en eau diminue significativement la rigidité et la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires de fondation, et le manque de support mécanique sous la couche d'enrobé bitumineux froide (fragile) la rend particulièrement sensible à une accélération du dommage en fatigue. Ces aspects sont donc des aspects négatifs liés à l'augmentation des températures hivernales en contexte de changements climatiques.

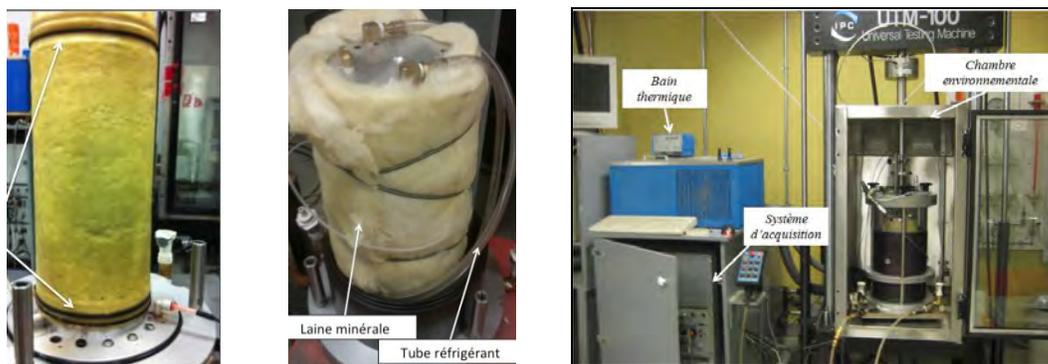
Cet aspect du travail de recherche est traité sur deux fronts distincts. Afin d'exploiter la relation entre le nombre de redoux hivernaux et la diminution de l'indice de gel, il est nécessaire de quantifier l'évolution du comportement des matériaux en fonction du nombre de redoux. Pour les matériaux granulaires, il est suggéré d'étudier leur sensibilité à s'endommager, et donc à accumuler de la déformation permanente, en fonction du nombre de redoux. Cet aspect est très difficile à étudier de façon théorique et aucune méthode adaptée n'existe à cet effet. Il est donc proposé de quantifier en laboratoire l'effet du nombre de redoux hivernaux sur la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires en cellule triaxiale et en simulateur de charge. Au moment d'écrire ce rapport, seules les données des essais triaxiaux sont compilées et accessibles. Au niveau de la fissuration de fatigue, les modèles disponibles permettent d'approcher cet aspect de façon plus théorique. En effet, l'étude de la relation entre la durée de vie des chaussées et la déformation en tension à la base du revêtement sous chargement de véhicules lourds est bien connue par diverses relations de transfert empirique reliant ces deux paramètres. De plus, la mesure de la réponse mécanique des chaussées dans les conditions typiques des redoux hivernaux requiert la connaissance de la sensibilité à la température et à la teneur en eau de la rigidité des couches d'enrobés bitumineux et des couches granulaires. Les recherches réalisées au Québec dans les dernières années ont permis de fournir des approches calculatoires et des modèles assez robustes sur des matériaux québécois afin de traiter cet aspect du travail par modélisation.

#### 5.2.3.1 Effet du nombre de redoux sur le comportement en déformation permanente des matériaux granulaires

---

Des essais de déformation permanente ont été réalisés sur des échantillons de MG-20 typiquement utilisés comme matériaux de fondation routière. Ces essais ont été réalisés en utilisant la même presse hydraulique et la même cellule triaxiale que celles utilisées dans le volet 1 du projet. L'objectif de ces essais est de faire subir des conditions similaires à celles rencontrées lors des redoux hivernaux dans les fondations (gel uniaxial, teneur en élevée, mauvais drainage, etc.). Ces essais serviront aussi à établir la relation entre le comportement en déformation permanente et le nombre de redoux. Les essais ont été réalisés par paliers de 12500 cycles de chargements avec une pression de confinement de 20 kPa et une contrainte déviatorique de 100 kPa. À chaque palier, les échantillons ont subi un cycle de gel et dégel. Afin de mesurer le comportement pour plusieurs cas, les essais ont été réalisés sur trois sources de matériaux granulaires : calcaire, basalte et gneiss granitique. De plus, différentes granulométries ont été testées : CS – Limite supérieure du fuseau spécifié par le MTQ; CI – Limite inférieure du fuseau spécifié par le MTQ; CN – Courbe telle que produite. Finalement, l'effet de la contrainte a aussi été vérifié.

La Figure 38 et la Figure 39 montrent quelques étapes et un schéma du montage des échantillons en cellule triaxiale, et certaines composantes du système. Les échantillons ont été compactés à la teneur en eau optimale et enveloppés dans une membrane en caoutchouc. Les échantillons sont enveloppés dans de la laine minérale et la tête de chargement est connectée, en circuit fermé, à un bain thermique faisant circuler du liquide réfrigérant. Avant le premier cycle de gel, l'échantillon est préalablement saturé. Par la suite, le gel de l'échantillon se fait de façon uniaxiale à une température de  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  imposée sur la tête de l'échantillon. Le gel se déroule jusqu'à l'obtention d'une température de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  mesurée à la base de l'échantillon. Durant le gel, les échantillons ont accès à l'eau pour permettre la croissance de lentilles de glace si les conditions y sont propices. Les soulèvements au gel sont mesurés durant la période de gel. Suite au gel, les échantillons sont dégelés en imposant une température de  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  sur la tête de l'échantillon avec le bain thermique. Suite au cycle de gel et dégel, les échantillons subissent 12500 cycles de charge en conditions non drainées et le comportement en déformation permanente ainsi que la pression interstitielle sont mesurés. Ce processus est recommencé quatre fois. Un 5<sup>ème</sup> cycle de chargement (50 000 cycles) est appliqué pour terminer la caractérisation, mais celui est appliqué en conditions drainées afin de simuler les conditions de récupération des couches granulaires lors du dégel complet. Le Tableau 20 résume le protocole d'essai suivi pour la réalisation d'un essai de déformation permanente en cellule triaxiale pour caractériser l'effet de la répétition du nombre de cycles de gel et dégel.



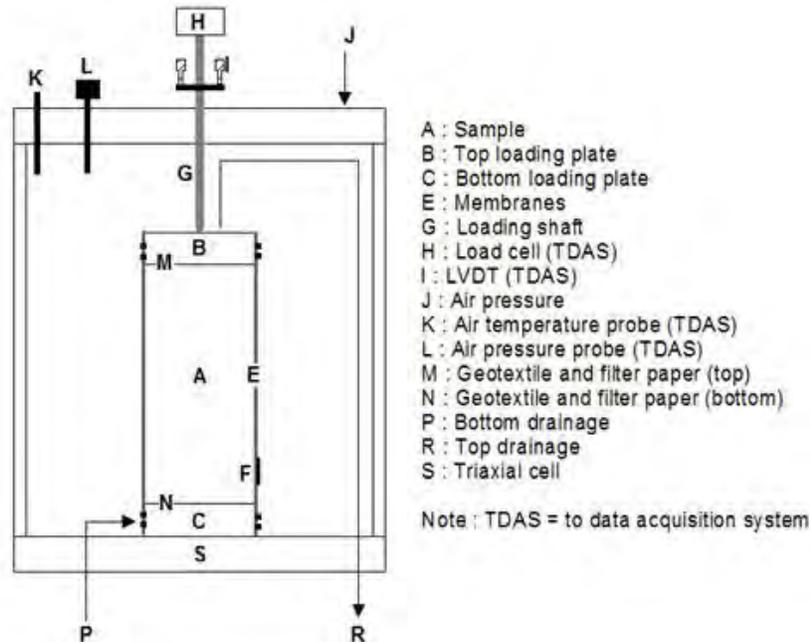


Figure 39. Schéma du montage triaxial (Bilodeau et al. 2011)

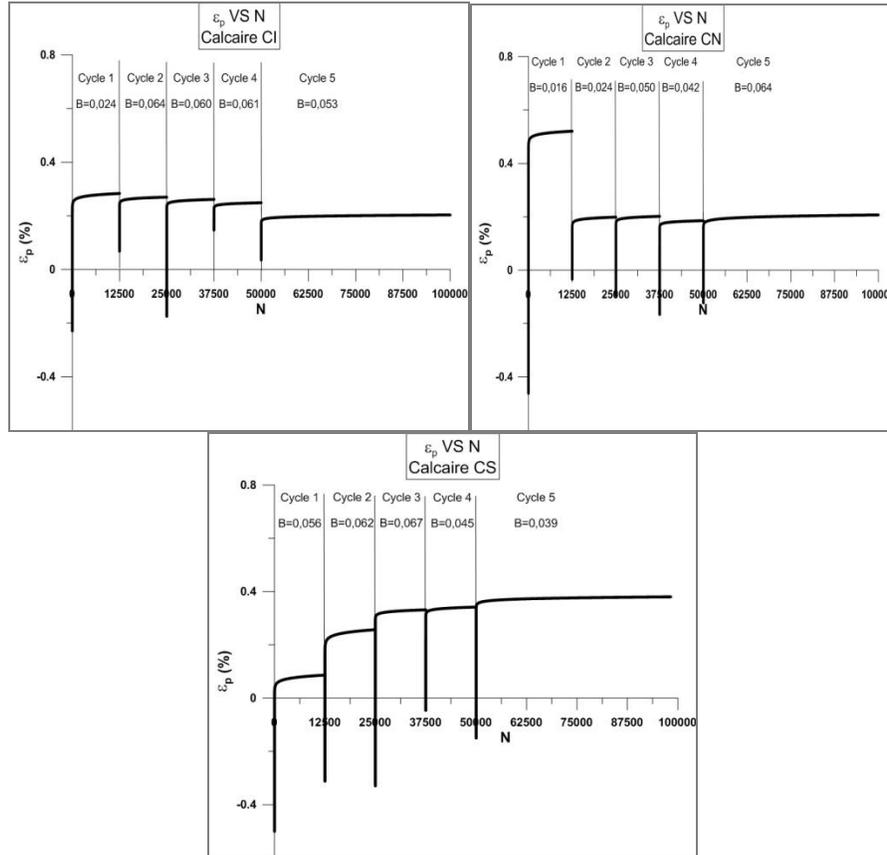
Tableau 20. Séquence d'essais lors de la caractérisation en déformation permanente avec la cellule triaxiale

Cycle gel-dégel	Nombre de chargement	Condition	Simulation
1 à 4	12 500	Non-drainée	Redoux hivernal
5	50 000	Drainé	Dégel au printemps

La Figure 40 présente des résultats typiques obtenus lors de ce type d'essais. Il est possible d'observer cinq courbes sur les graphiques, correspondant aux quatre essais de 12500 cycles après un cycle de gel et dégel et aux 50000 cycles correspondant à la période de récupération en conditions drainées. Lorsque des soulèvements au gel se produisent, ceux-ci contrecarrent, du point de vue de la déformation totale des échantillons, la déformation permanente accumulée. C'est la raison pour laquelle les courbes sont discontinues. À la fin d'un palier, le gonflement au gel d'un échantillon fait diminuer la déformation permanente et le cycle suivant commence à accumuler de la déformation permanente à une déformation plus faible qu'à la fin du palier précédent. Les résultats obtenus pour chacun des paliers sont modélisés avec le modèle de Dresden défini par

$$\epsilon_p = a \left( \frac{N}{1000} \right)^b + c(e^{0,001dN} - 1) \quad (20)$$

Dans laquelle a, b, c et d sont des constantes de régression, N est le nombre de cycles de chargements, e est le nombre népérien et  $\epsilon_p$  est la déformation permanente. Le second terme de l'équation est utile pour définir la phase de rupture si jamais celle-ci est observée. Dans le cas des matériaux testés, plusieurs phases de rupture ont été observées pour le gneiss granitique et le basalte. Tout comme dans le volet 1 de ce projet de recherche, l'analyse est principalement orientée sur le paramètre b, car c'est celui qui est associé à la performance à long terme des matériaux. Ce dernier est associé au taux de déformation permanente.



**Figure 40. Résultats des essais de déformation permanente par paliers de cycles de gel et dégel sur trois matériaux calcaires (CS, CI et CN)**

Les Figures Figure 41 à Figure 43 présentent les paramètres  $b$  modélisés en fonction du nombre de redoux hivernaux pour différents cas testés lors des essais. En ce qui concerne l'effet de la granulométrie, les résultats de la Figure 41 montre qu'il n'existe pas de tendance claire à ce sujet. Néanmoins, il est possible d'observer que les courbes granulométriques contenant moins de particules fines (CI et CN) montrent des valeurs qui sont peut-être globalement légèrement plus faibles. Les valeurs de la CI tendent aussi vers une stabilisation avec l'évolution des redoux hivernaux, alors que la tendance générale est à l'augmentation pour la courbe CN. L'analyse détaillée des premiers de chargement de chaque palier pour les essais réalisés sur le calcaire montre que ceux-ci ont un comportement globalement stable. En ce qui concerne l'effet de la source granulométrique pour une courbe granulométrique équivalente, la Figure 42 présente une synthèse des résultats obtenus. Il est possible de constater que le basalte et le gneiss présentent des valeurs de  $b$  beaucoup plus élevées que le calcaire. Ceci est dû au fait que ces matériaux ont montré maintes fois des phases de rupture lors des paliers de chargements suivant un cycle de gel et dégel. D'ailleurs, l'analyse détaillée des premiers cycles de chargement de plusieurs paliers de ces deux matériaux montre clairement un comportement associé à l'instabilité. Les valeurs de  $b$  sont dans ces cas typiquement très élevées. Aucune phase de rupture n'a été observée pour les matériaux calcaires. Dans le cas, du gneiss, une tendance à l'augmentation assez nette est observée pour la valeur de  $b$  en fonction du nombre de redoux hivernaux. Finalement, la Figure 43 présente les résultats obtenus pour un essai réalisé sur le calcaire CS. Cependant, chaque palier de chargement a été divisé en 6250 cycles de charges à une contrainte déviatorique de 50 kPa et 6250 cycles de charges à une contrainte déviatorique de 100 kPa. Cette procédure est suivie dans le but de représenter l'effet que pourrait avoir, par exemple, l'épaississement de la couche de pavage pour mitiger l'effet de l'augmentation du nombre de redoux hivernaux. Il est possible de constater que la diminution de la contrainte a un effet bénéfique sur le paramètre  $b$ , mais que cet effet tend à s'estomper avec le nombre de cycle de gel et dégel que subit l'échantillon. Néanmoins, pour le nombre de redoux hivernaux appliqués, qui est assez représentatif du

nombre de redoux hivernaux typiques pouvant être anticipés selon les données présentées dans ce rapport, il est possible de mentionner que la diminution de la contrainte aura un effet bénéfique non négligeable, mais qui tend à diminuer fortement après 4 cycles épisodes de redoux. Il est finalement possible de noter que les résultats de cet essai montrent aussi clairement une augmentation générale, pour chacune des deux contraintes, du paramètre  $b$  avec les redoux hivernaux.

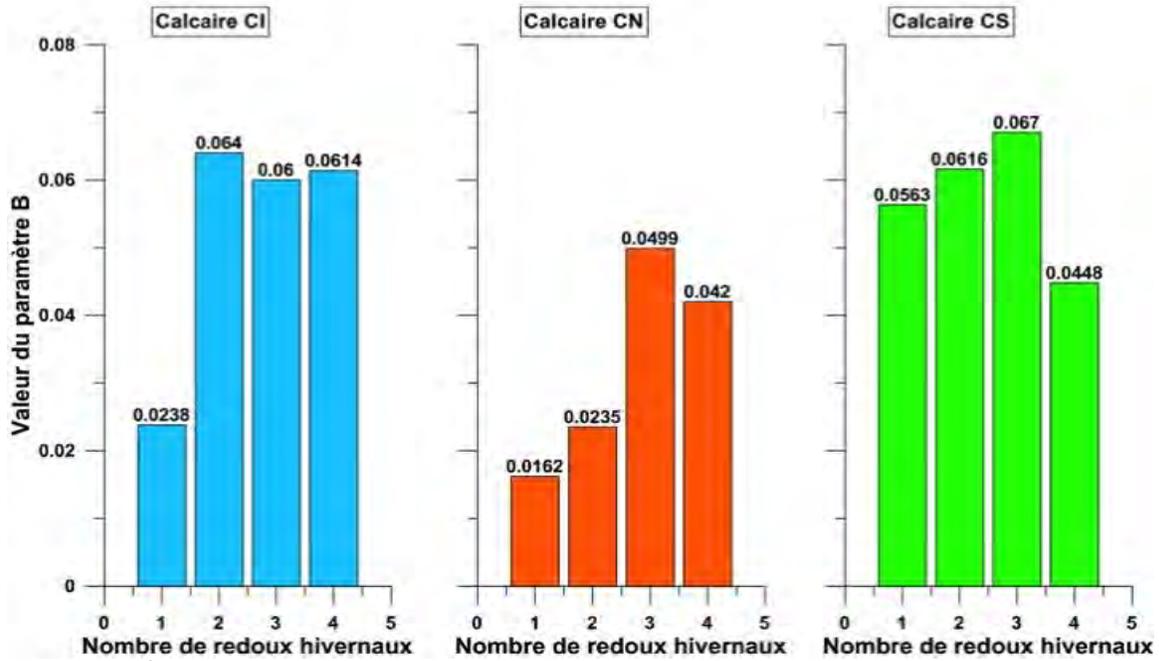


Figure 41. Évolution du paramètre  $b$  en fonction du nombre de redoux hivernaux pour les matériaux calcaires

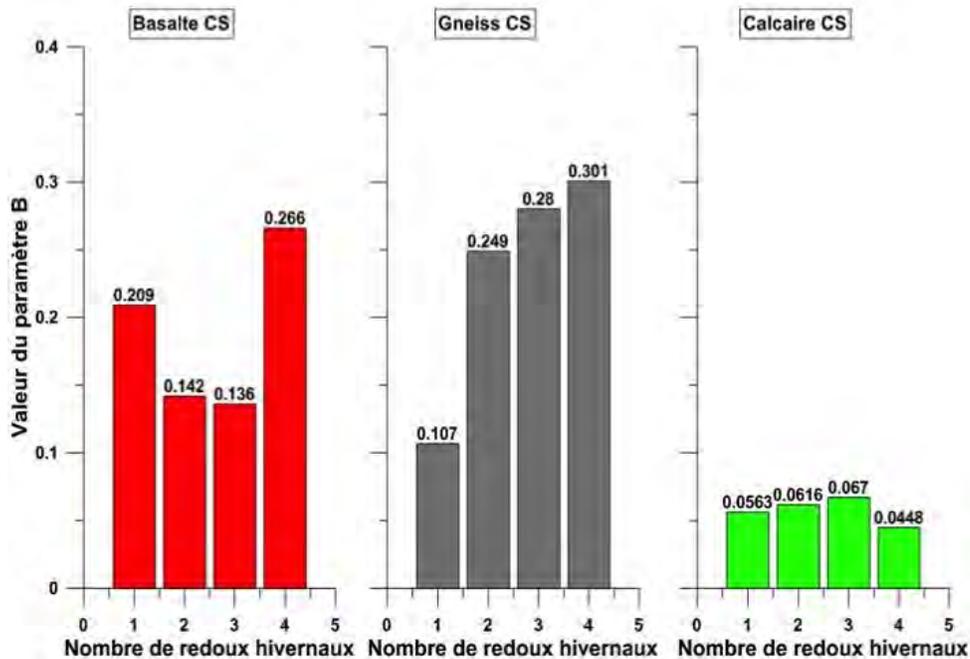


Figure 42. Évolution du paramètre  $b$  en fonction du nombre de redoux hivernaux pour les courbes CS (calcaire, basalte, gneiss)

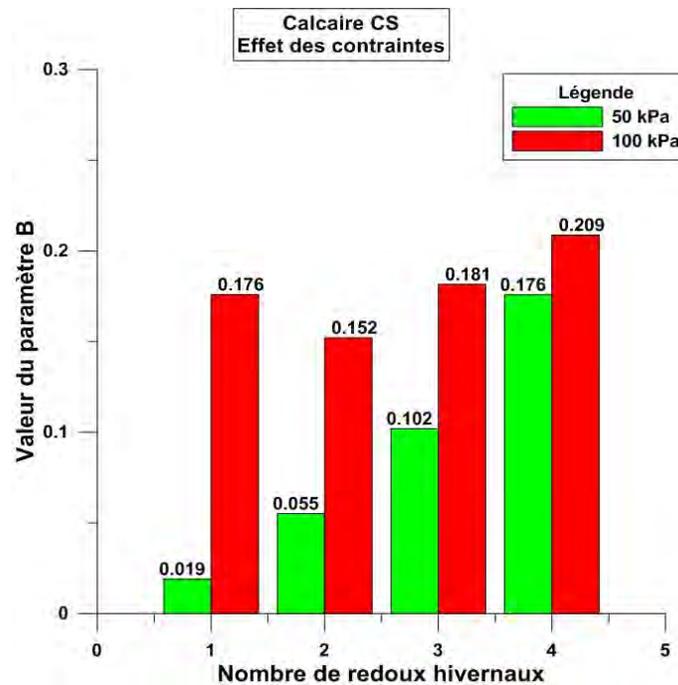


Figure 43. Évolution du paramètre  $b$  en fonction du nombre de redoux hivernaux et du niveau de contrainte (calcaire CS)

La relation entre le paramètre  $b$  et le nombre de redoux hivernaux est présentée à la Figure 44. Une grande disparité dans ces résultats est observée. Celle-ci est conséquente aux phases de rupture montrées par plusieurs matériaux, ce qui est typiquement associé à des valeurs élevées du paramètre  $b$ . Cependant, la condition de

rupture est associée aux essais triaxiaux et n'est pas typique de ce qui est rencontré sur une chaussée en conditions réelles d'exploitation. C'est pourquoi, pour les besoins de ce projet et des analyses, les résultats associés aux phases de rupture ne sont pas considérés. Ainsi, la relation entre les paramètres b moyens et le nombre de redoux hivernaux peut être obtenue et celle-ci suit une relation linéaire exprimée

$$b = 0,0061N_{b_{dx}} + 0,03233 \quad (21)$$

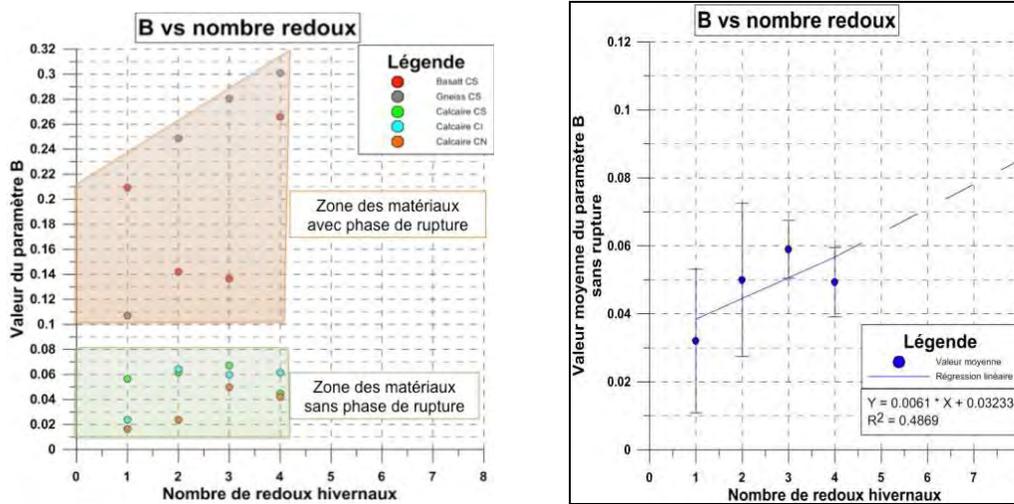
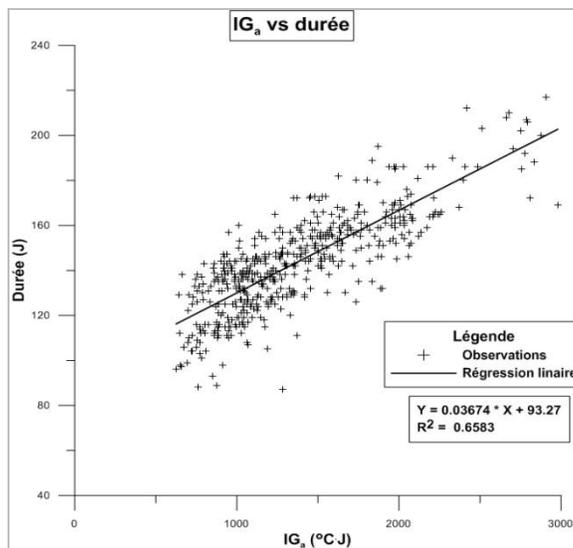


Figure 44. Étude de la relation entre le paramètre B et le nombre de redoux hivernaux

La relation proposée entre le paramètre b et le nombre de redoux hivernaux peut être exploitée en combinaison avec le principe d'endommagement saisonnier, fréquemment utilisé en analyse et conception des chaussées. Selon cette approche, une année est divisée en saisons typiques durant lesquelles il est possible d'attribuer aux matériaux des couches des propriétés représentatives des conditions pour chaque saison. Plusieurs documents ont été consultés afin de définir les caractéristiques des saisons qui ont été utilisées pour cette analyse (DeBlois 2005; Doré et Zubeck 2009; Konrad 1994). La base de données du logiciel MnPave (logiciel de conception mécaniste-empirique de l'état du Minnesota) a aussi été exploitée, car celle-ci contient beaucoup d'information sur la durée des saisons et les propriétés des matériaux qui y sont associées en analyse des chaussées flexibles. Le Tableau 21 présente la durée des saisons qui a été établie à partir de la littérature consultée. En moyenne, la littérature consultée suggérait que la période de début du dégel (dégel de la fondation) dure environ 14 jours et que le dégel complet des couches structurales prend 26 jours (supplémentaires), ce qui est en accord avec les données contenues dans MnPave. Une saison a été associée aux redoux hivernaux. Comme il a été mentionné dans ce rapport, il a été possible d'établir qu'un redoux hivernal dure en moyenne 5 jours. Ainsi, le nombre de redoux prévu pour chaque saison et chaque période a été multiplié par 5 jrs afin d'obtenir le nombre de jours annuel associé aux redoux. La durée des saisons hivernales en fonction des zones et de la période a été établie à partir d'une relation entre l'indice de gel de l'air et la durée de la période hivernale identifiée lors de l'analyse des données météorologiques dans le cadre de ce projet (Figure 45). La durée de la période automnale a été fixée à 1 mois dans le cadre de cette analyse. De ce fait, la durée de la période estivale a donc été ajustée par soustraction.

**Tableau 21. Durée des saisons pour la période de référence (1971-2000) et pour la période projetée (2011-2040) pour le 5<sup>ème</sup> et le 95<sup>ème</sup> percentile pour l'analyse de l'endommagement saisonnier par déformation permanente**

Période	Zone	Été	Automne	Hiver	Redoux	Début dégel	Fin dégel
1970-2000 Référence	1	157	31	107	25	14	26
	2a	147	30	140	5	14	26
	2b	137	31	154	0	14	26
	2c	147	30	120	25	14	26
	3	123	31	168	0	14	26
2011-2040 95 <sup>e</sup> percentile	1	162	31	93	36	14	26
	2a	156	30	120	16	14	26
	2b	146	31	145	0	14	26
	2c	163	30	92	37	14	26
	3	129	31	162	0	14	26
2011-2040 5 <sup>e</sup> percentile	1	169	31	87	36	14	26
	2a	161	30	115	16	14	26
	2b	153	31	138	0	14	26
	2c	170	30	85	37	14	26
	3	136	31	155	0	14	26



**Figure 45. Relation identifiée entre la durée de la période hivernale et l'indice de gel de l'air**

Afin de réaliser cette analyse, il a également été nécessaire de poser des degrés de saturation typiques pour la couche de fondation en fonction des saisons. L'identification de ces valeurs de degrés de saturation est nécessaire pour calculer une valeur de b typique représentative des saisons selon l'équation de Poupart (2013). Cette équation est définie par

$$b = 10^{(1,2039 - 1,03 \times \rho^d / \rho_{dmax} - 0,018164 \times \%FR + 0,00635r)} \quad (22)$$

dans laquelle  $\rho^d / \rho_{dmax}$  (%) est la compacité du matériau, %FR (%) est le pourcentage de fracturation et Sr le degré de saturation (%). En posant l'hypothèse simplificatrice et réaliste que la compacité des matériaux est maximale et qu'il s'agit de matériaux concassés (%FR=100), la relation entre le paramètre b et le degré de saturation est alors obtenue. La base de données de l'Université Laval sur les matériaux granulaires, les travaux de DeBlois (2006) et l'ouvrage de Doré et Zubeck (2009), ont permis d'établir un degré de saturation de 52%

( $b=0,0486$ ) en été, 65% ( $b=0,0585$ ) en automne et de 70% ( $0,0629$ ) à la fin du printemps. Pour la période de redoux, la valeur de  $b$  a été établie à partir de la relation préalablement identifiée. Il a été considéré que la valeur de  $b$  est nulle en hiver puisque la chaussée est complètement gelée. Le calcul de la valeur de  $b$  pondérée a été effectué selon l'équation

$$b_{pi} = S_i b_i \quad (23)$$

dans laquelle  $b_{pi}$  est la valeur du paramètre  $b$  pondérée en pourcentage annuel,  $b_i$  est le paramètre  $b$  pour la saison examinée et  $S_i$  est la durée de la saison en pourcentage annuel. Les valeurs de  $b_{pi}$  ont été sommées suite à l'analyse pour chaque saison selon

$$\frac{\sum_1^i b_{pi} \text{ présent}}{\sum_1^i b_{pi} \text{ futur}} \quad (24)$$

La Figure 46 présente les résultats de l'analyse par endommagement saisonnier en déformation permanente. L'obtention de durée de vie relative inférieure à 100%, selon l'équation présentée ci-haut, propose que l'endommagement en orniérage soit plus important dans la période 2011-2040 que pour la période présente. En moyenne pour toutes les zones et les deux scénarios considérés, la durée de vie relative variera de 92,7 à 90,3 %. Il existe peu de variabilité dans les résultats. Il est cependant possible de noter que la zone 3 subirait le moins d'effet, puisqu'aucune augmentation du nombre de cycles de gel et dégel n'y est prévue. Cependant, chaque zone subit des diminutions de vie relative, puisque la durée des hivers diminue, diminuant la durée d'une période durant laquelle il ne se produit pas de dommage à la chaussée. La zone 2c, puisqu'elle subira un nombre élevé de cycle de gel et dégel durant la période analysée (10), voit sa durée de vie relative diminuer le plus significativement parmi les zones analysées.

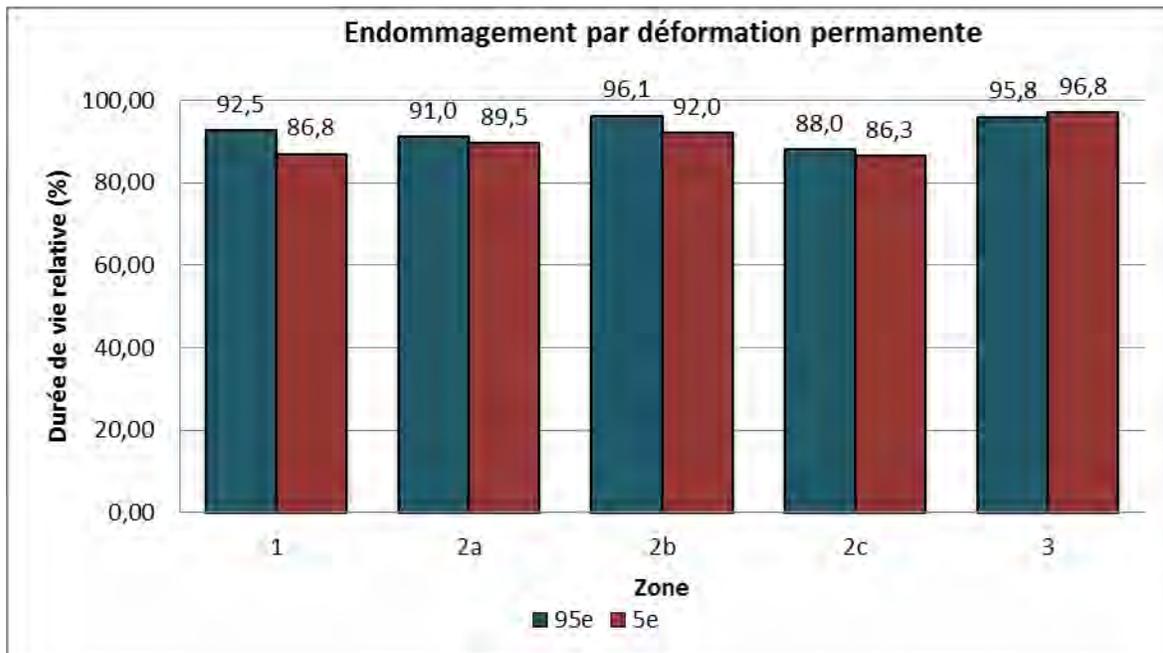


Figure 46. Résultats de l'analyse d'endommagement saisonnier par déformation permanente pour la période 2011-2040

### 5.2.3.2 Effet du nombre de redoux hivernaux sur l'endommagement par fatigue des chaussées flexibles

Afin de quantifier les effets négatifs des changements climatiques sur l'endommagement par fatigue des chaussées flexibles, une méthodologie similaire à celle employée pour la déformation permanente a été utilisée. Ainsi, le principe de l'endommagement saisonnier a été exploité afin de pondérer l'effet des saisons et de leur évolution dans le temps pour déterminer si le dommage par fatigue est susceptible de progresser plus rapidement dans le futur. Dans un premier temps, il a été nécessaire, tout comme pour l'analyse en déformation permanente, de déterminer la durée des saisons. Le Tableau 22 présente la durée des saisons fixée selon les mêmes principes que dans la section précédente. Cependant, la durée du début du dégel a été augmentée, car la période durant laquelle l'enrobé bitumineux est plus sensible à s'endommager par fatigue est plus longue, généralement associée au dégel des matériaux granulaires. Ainsi, un ajustement a été effectué à cet effet.

**Tableau 22. Durée des saisons pour la période de référence (2000) et pour les périodes projetées 2011-2040 (95e et 5e percentile) pour l'analyse d'endommagement par fatigue**

Période	Zone	Été	Automne	Hiver	Redoux	Début dégel	Fin dégel
1970-2000 Référence	1	157	31	107	25	26	14
	2a	147	30	140	5	26	14
	2b	137	31	154	0	26	14
	2c	147	30	120	25	26	14
	3	123	31	168	0	26	14
2011-2040 95 <sup>e</sup> percentile	1	162	31	93	36	26	14
	2a	156	30	120	16	26	14
	2b	146	31	145	0	26	14
	2c	163	30	92	37	26	14
	3	129	31	162	0	26	14
2011-2040 5 <sup>e</sup> percentile	1	169	31	87	36	26	14
	2a	161	30	115	16	26	14
	2b	153	31	138	0	26	14
	2c	170	30	85	37	26	14
	3	136	31	155	0	26	14

L'analyse de l'endommagement par fatigue fait appel au calcul de la réponse de la structure de chaussées, en termes de déformation en tension à la base du revêtement, calculée à partir d'un logiciel pour les systèmes multicouches linéaires élastiques. Dans un tel logiciel, les propriétés typiques des matériaux associés à chaque saison sont entrées pour obtenir les contraintes, déformations et déplacements en tous points dans le système et pour une charge de surface donnée. La déformation en tension à la base du revêtement est alors introduite dans une fonction de transfert empirique pour la fatigue, afin de calculer la durée de vie du système pour les conditions données. Afin de prendre en compte la variation des propriétés des enrobés bitumineux avec les conditions de températures, le modèle proposé par le MTQ a été utilisé. Celui-ci est défini par

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}} \quad (25)$$

$$f_r = a_T \times f \quad (26)$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2 \quad (27)$$

dans lesquelles T est la température dans l'enrobé (°C), Tr est la température de référence (10 °C), |E\*| est le module dynamique (MPa), fr est la fréquence réduite (Hz), f est la fréquence (Hz) et a1, a2, α, β, γ et δ sont des coefficients de régression propres au type d'enrobé et de bitume. L'analyse de l'endommagement par fatigue a été réalisée pour deux types de routes tel que présenté au Tableau 23, soient pour une route nationale et une route régionale. Pour déterminer le module dynamique utilisé dans l'analyse, les calculs ont été effectués pour un enrobé de type ESG-10, mais pour plusieurs types de bitume (PG64-34, PG58-34, PG70-28 et PG58-28) en fonction du type de route analysée. Les normes du MTQ ont été exploitées à cet effet en fonction des zones considérées. Les propriétés mécaniques des sols pour les analyses sont présentées au Tableau 24 et ont été tirées du logiciel MnPave. Pour ce qui est de la couche de revêtement, les propriétés mécaniques ont été ajustées à chaque saison en fonction des températures de l'air converties en température dans le revêtement. Pour les calculs dans le logiciel multicouche linéaire élastique, une charge standard de 40 kN appliquée sur une surface circulaire de 70685 mm<sup>2</sup> a été considérée. Le coefficient de poisson a été fixé à 0,35 pour toutes les couches, sauf pour la couche de sol d'infrastructure (0,45). La loi de fatigue utilisée est celle de l'état du Minnesota intégrée dans le logiciel MnPave. Celle prend la forme de

$$N_{adm} = C K_{F1} \left(\frac{1}{\varepsilon_h}\right)^{K_{F2}} \left(\frac{1}{E}\right)^{K_{F3}} \quad (28)$$

dans laquelle N<sub>adm</sub> est le nombre de passages admissibles avant la rupture par fatigue (25% du sentier de roue fissuré), C = 0,314, K<sub>F1</sub> = 1,2, K<sub>F2</sub> = 3,291 et K<sub>F3</sub> = 0,854.

**Tableau 23. Structure de chaussées analysées pour l'endommagement par fatigue**

Couche	Route Nationale				Route Régionale			
	Épaisseur	Trafic	Année	ÉCAS	Épaisseur	Trafic	Année	ÉCAS
Enrobé bitumineux	170	5000	30	5M	130	2000	25	2M
Fondation	250	à			225	à		
Sous-fondation	750	20 000			750	3000		
Sol d'infrastructure	∞				∞			

**Tableau 24. Caractéristiques mécaniques des couches de chaussées pour l'analyse saisonnière**

Saison	Fondation Mr (Mpa)	Sous-fondation Mr (Mpa)	Sol d'infrastructure Mr (Mpa)
Hiver	350	350	69
Redoux	59	350	69
Début dégel	59	65	69
Fin dégel	138	151	48
Été	168	183	59
Automne	165	191	6.89

Afin de faire le calcul de l'endommagement saisonnier, la loi de Miner a été utilisée. Celle-ci permet de calculer le dommage pour une saison D<sub>i</sub>, et de calculer le dommage total en faisant la sommation des D<sub>i</sub>. La loi de Miner est définie par

$$D_T = \sum_1^i \frac{n_i}{N_i} = \sum_1^i D_i \quad (29)$$

dans laquelle n<sub>i</sub> est le nombre de répétitions de charges prévues pour la saison i, N<sub>i</sub> est le nombre admissible de répétitions de charges pour la saison i et D<sub>T</sub> est le dommage total. Le calcul de la durée de vie relative a été effectué pour la période 2011-2040 et la période référence 1971-2000 à l'aide de l'équation

$$\frac{D_T \text{ référence}}{D_T \text{ futur}} \quad (30)$$

Les résultats de l'analyse de l'endommagement saisonnier par fatigue sont présentés aux Figure 47 et Figure 48, selon deux scénarios climatiques (5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentile). Il est possible de constater que les résultats sont très similaires pour les deux classes de route. En moyenne, selon les scénarios, la durée de vie relative diminue à des valeurs entre 91,4 et 97,4%. Ces résultats sont aussi du même ordre de grandeur que ceux obtenus lors du calcul de l'endommagement saisonnier par déformation permanente. Il doit être noté que, une partie de la diminution de cette durée de vie relative est attribuable à la diminution de la durée de la période hivernale dans le futur. Comme il s'agit d'une période où il se produit peu de dommage par fatigue, la diminution de cette période induit une augmentation du dommage en fatigue. Cependant, l'augmentation du nombre de redoux influence aussi les résultats et les conditions de redoux prévues pour chacune des zones pour la période future, ont été appliquées à cette analyse. Il n'existe pas de différence significative entre une route nationale ou une structure moins portante comme une route régionale, les dommages relatifs étant très similaires. Il est toutefois possible de mentionner que la zone 2c est celle montrant la diminution de la durée de vie relative la plus importante. Ceci est probablement explicable par le fait que, avec la zone 1, il s'agit de la zone qui risque de subir le plus de redoux hivernaux.

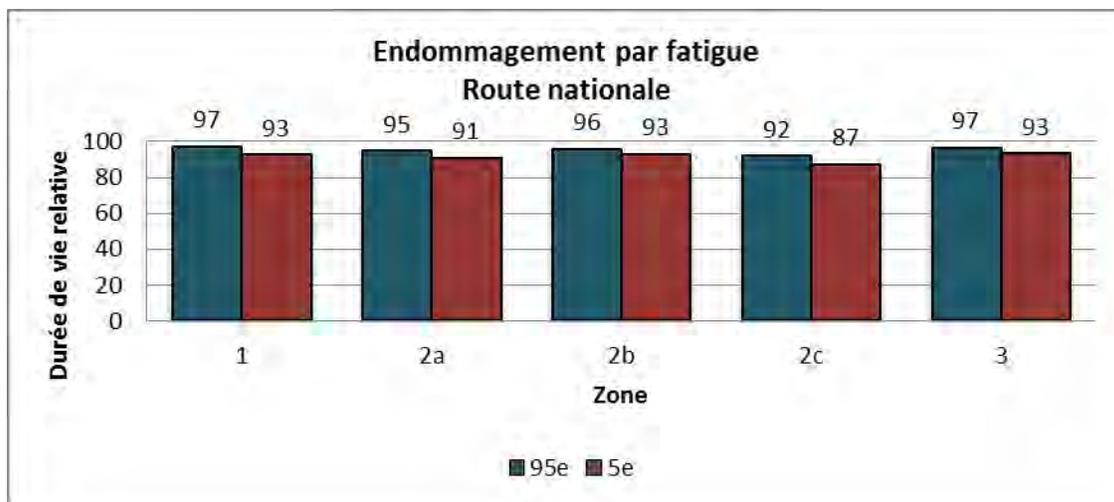


Figure 47. Résultats du calcul de l'endommagement saisonnier pour la route nationale

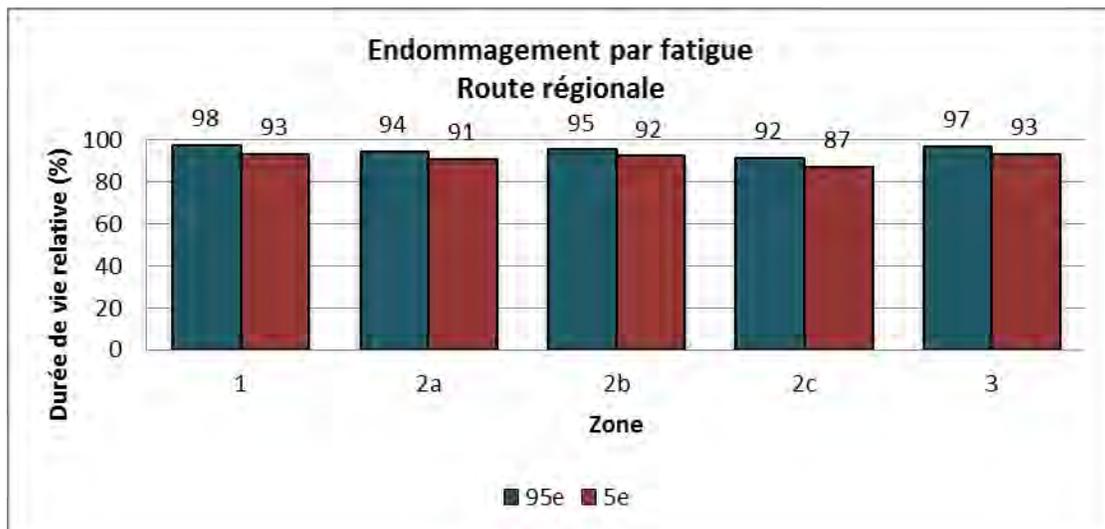


Figure 48. Résultats du calcul de l'endommagement saisonnier pour la route régionale

## 6 Analyse et discussion

---

Ce rapport fait un résumé exhaustif des résultats obtenus dans le cadre de deux projets de maîtrise distincts. Le premier projet a porté sur l'effet de l'augmentation des précipitations sur le comportement à long terme des chaussées flexibles. Ce volet de l'étude porte essentiellement sur un aspect négatif des changements climatiques. Le second projet a été orienté sur l'effet de l'adoucissement des températures hivernales. Cet aspect est particulier, car ce phénomène est bénéfique du point de vue de la profondeur de gel. En effet, une diminution de la profondeur de gel durant l'hiver est susceptible de diminuer les dommages associés aux soulèvements au gel qui se produisent dans les sols d'infrastructures gélifs. L'adoucissement des températures hivernales est aussi bénéfique du point de vue de la fissuration thermique des enrobés. Cependant, la diminution des températures hivernales est susceptible d'être associée à une augmentation des redoux hivernaux, qui provoquent des conditions similaires à celles rencontrées tôt au printemps, et qui sont très dommageables pour l'endommagement par déformation permanente et par fatigue des chaussées. Il s'agit donc d'un aspect négatif lié aux changements climatiques. Le second volet s'est donc concentré sur cet aspect.

D'une façon générale, l'effet des changements climatiques sur les chaussées varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de route, le type de sol et la position géographique. Les travaux ont donc cherché à prendre ces aspects en compte. Naturellement, il existe plusieurs incertitudes quant aux simulations du climat pour les prochaines décennies et plusieurs scénarios d'augmentation des gaz à effet de serre existent. Comme ces scénarios sont variables, les résultats des simulations climatiques peuvent grandement différer en fonction des intrants utilisés pour celles-ci. C'est une des raisons pour lesquelles la plupart des résultats présentés dans le cadre de ce rapport sont abordés selon une approche plus optimiste ou plus pessimiste.

Du point de vue des effets négatifs, peu importe si l'effet des précipitations ou de l'augmentation du nombre de redoux hivernaux est considéré, la perte de durée de vie est sensiblement la même. En effet, en moyenne et en considérant l'ensemble des scénarios considérés, la perte de durée de vie des ouvrages routiers varie de 0 à 15%, 7 à 10% et 3 à 9% pour l'effet de l'augmentation des précipitations sur l'orniérage des chaussées, pour la déformation permanente due aux redoux hivernaux et la fissuration par fatigue, respectivement. Il existe une certaine cohérence dans ces résultats. Ces remarques excluent l'analyse basée sur le module réversible pour l'effet des précipitations sur la performance en orniérage des chaussées. En effet, cette analyse donne des résultats significativement plus élevés en termes de perte de durée de vie. Ceux-ci oscillent entre 7 et 32%, ce qui représente donc une perte de durée de vie de presque du tiers selon les scénarios les plus pessimistes liés à l'augmentation des précipitations. Cette méthode d'analyse est éprouvée et reconnue, mais fait intervenir des caractéristiques mécaniques (élasticité) différentes de celles qui interviennent pour l'analyse en déformation permanente (plasticité). Lorsque décortiqués par zone, les effets négatifs des changements climatiques semblent plus importants pour la zone 3 et les moins élevés pour la zone 1 pour l'orniérage dû à l'augmentation des précipitations. Ce résultat est cohérent pour la zone 3, car c'est la zone où l'augmentation des précipitations la plus importante est prévue. Pour l'effet des redoux hivernaux, la zone 2c est celle qui semble la plus affectée, mais la variation d'une zone à l'autre est très faible. Ainsi, la perte de durée de vie dans la zone 1 due aux redoux hivernaux est aussi significative. Ceci a une grande importance, car c'est dans cette zone qu'une grande proportion du réseau routier est retrouvée, car cette zone comprend plusieurs grands centres. Les coûts reliés à la perte de durée de vie des chaussées dans la zone 1 sont potentiellement plus importants à cause du grand nombre de chaussées concernées, mais qui plus est de leur importance et de la logistique nécessaire pour réaliser des interventions.

Du point de vue des effets positifs liés à la diminution des températures hivernales, il a été démontré qu'il est possible de diminuer l'épaisseur de la sous-fondation des chaussées dans la zone 1 et 2 pour les structures construites sur des sols gélifs. Dans la zone 3, cette diminution peut s'appliquer aussi aux sols moyennement gélifs. L'économie de matériaux est de l'ordre de 75 à 125 mm. Ces résultats ont permis de mettre à l'épreuve une méthodologie de réduction de l'indice de gel de l'air qui semble donner des résultats cohérents. Par exemple, il a été montré que l'endommagement total à la fin de la durée de vie d'une chaussée, en termes de dégradation de l'Indice de Rugosité International, est le même si un indice de gel non corrigé est utilisé que si un indice de gel corrigé est appliqué à une structure corrigée.

L'intégration des effets positifs et négatifs des changements climatiques n'est pas simple puisqu'elle fait intervenir des phénomènes différents. En effet, bien que l'endommagement de l'IRI des chaussées risque de diminuer dû à la diminution de l'indice de gel de l'air, ce type de dommage est lié avec le comportement au gel de la chaussée. Les agences de Transports interviennent lorsque la valeur de l'IRI atteint un seuil critique qui implique que la capacité fonctionnelle de la chaussée n'est plus adéquate. D'un autre côté, le dommage en orniérage, ou en fatigue, fait intervenir la réponse des matériaux de chaussées à la charge. Dans le cas de ce type de dommages, les agences de transports ont aussi des seuils critiques d'intervention. En particulier, l'orniérage peut causer d'importants problèmes de sécurité pour les usagers de la route. Ainsi, l'atteinte d'un seuil d'intervention pour des dommages liés à la charge peut nécessiter des travaux de voirie même si l'IRI de la chaussée est encore adéquat. Il existe néanmoins des relations entre ces phénomènes. Par exemple, d'importants soulèvements au gel sont associés à d'importantes pertes de capacité de support lors du dégel du sol d'infrastructure et des lentilles de glace. Ce dégel des couches profondes au printemps amplifie l'action des charges lourdes et peut accélérer les dommages liés à la charge. Ainsi, l'analyse combinée des effets négatifs et positifs des changements climatiques est relativement complexe. Comme plusieurs paramètres influencent l'interaction entre le climat, les charges et les structures de chaussées, une quantification précise des effets des changements climatiques devient très complexe. Dans le cadre de ce travail de recherche, il a été décidé de travailler sur des paramètres de performance précis et distincts des structures de chaussées (orniérage structural, fissuration de fatigue, IRI). Cette approche permet de bien cibler une relation relativement simplifiée entre un paramètre de performance et un paramètre climatique. Cette approche s'intègre bien avec les approches les plus communes de conception et d'analyse des chaussées flexibles. Néanmoins, la complexité et le nombre des paramètres en cause dans la relation générale entre la performance des chaussées et le climat permet de croire qu'une étape supplémentaire à un projet de recherche comme celui réalisé est nécessaire. Ces recherches supplémentaires devraient être davantage axés sur la performance de systèmes de chaussées, en comparaison avec la performance de matériaux, lorsque soumises à l'action combinée de l'augmentation de la saturation et des températures. Il serait souhaitable que de telles recherches soient réalisées en utilisant des systèmes de chargements s'approchant des sollicitations réelles.

Parmi les pistes de solutions qui sont à envisager pour l'adaptation des chaussées pour contrer les effets des changements climatiques, il existe certaines avenues qui méritent d'être considérées, notamment :

- Modification de la géométrie des ouvrages : pour pallier à l'augmentation des précipitations, cette avenue permettrait de s'assurer que l'eau de précipitation n'atteigne pas les couches de sols sous la chaussée et contribue à l'augmentation des teneurs en eau;
- Intensification de l'entretien : la venue d'eau des précipitations et de la fonte de la neige devient particulièrement nuisible au comportement des chaussées si elle s'infiltré dans les structures. Un scellement de fissures ou des nettoyages de fossés plus fréquents, par exemple, permettraient de s'assurer de la bonne gestion des eaux et de l'étanchéité de la surface;
- Réduction de la sensibilité des sols à l'eau : les deux problématiques identifiées et analysées dans ce projet font intervenir, entre autres, l'effet négatif de l'eau sur le comportement mécanique des matériaux et des couches de chaussées. Il est possible d'appliquer des traitements (chaux, ciment, émulsion) aux sols et aux matériaux afin de ceux-ci soient plus compétents ou moins sensibles à l'eau. Les corrections, telles que les corrections granulométriques, des matériaux pour les rendre moins sensibles à l'eau peuvent aussi être envisagées;
- L'utilisation de couches spéciales de drainage et de renforcement : l'utilisation de géocomposites pour maximiser l'expulsion rapide de l'eau d'infiltration et de géogrilles pour augmenter la résistance à l'orniérage des structures de chaussées sont des avenues envisageables dans certaines circonstances.
- Renforcement de la structure : le renforcement structural des chaussées notamment par l'épaississement du revêtement permet d'augmenter la résistance à la fatigue et à l'orniérage;
- Modification de l'albédo de la surface afin de ralentir les effets négatifs du dégel.

Suite à la réalisation de ce projet et aux éléments de discussion apportés dans le cadre de ce rapport, il est possible de formuler certaines recommandations quant aux suites à donner à ces travaux de recherche. Les travaux réalisés

dans le cadre de ce projet ont principalement axés sur la quantification de l'impact des changements climatiques. Une partie importante des travaux futurs doit porter notamment sur l'efficacité des pistes d'adaptation aux changements climatiques, notamment leur capacité à réduire les problèmes à coûts raisonnables. Ainsi, les recommandations et les travaux futurs proposés sont les suivants :

- Réalisation de projets de recherche davantage axés sur les gains pouvant être obtenus lors de l'application des méthodes de mitigation et sur leurs avantages coûts-bénéfices;
- Réalisation d'analyse économique détaillée sur les coûts associés aux pertes de durée de vie identifiée et quantifiée dans ce projet;
- Augmentation du contenu de la base de données sur les précipitations et les teneurs en eau dans les sols. Bien qu'adéquate, la relation identifiée et utilisée dans ce projet présente une certaine variabilité et il serait souhaitable de bonifier cette relation afin de mieux définir comment évolue la teneur en eau dans les sols avec les précipitations;
- Réalisation d'essais en vraie grandeur sur l'effet de la diminution des températures hivernales et sur l'augmentation des précipitations. Dans ce projet, les essais triaxiaux et le simulateur de laboratoire ont été utilisés. Bien que ces équipements conviennent, les chargements sont différents de ceux d'un véhicule lourd réel en mouvement. Un équipement comme le nouveau simulateur routier, pleine grandeur, de l'Université Laval, ainsi que la fosse de laboratoire, peuvent permettre de tester les effets des cycles de gel et dégel, de la teneur en eau et de la profondeur de gel, sur l'endommagement à long terme d'une vraie structure de chaussée soumise à de vraies conditions de chargement. Dans les essais de laboratoire conventionnels, il existe des effets d'échelle non négligeable pouvant influencer les résultats. La réalisation d'essais pleine grandeur est une étape importante dans la poursuite des travaux pour la quantification des effets des changements climatiques sur les structures de chaussées au Québec.

## 7 Conclusion

---

Les changements climatiques anticipés au Québec au cours des prochaines décennies auront plusieurs effets. Selon les scénarios analysés dans le cadre de ce rapport, une augmentation des précipitations, variable selon les régions géographiques du Québec, les saisons et les horizons considérés, de l'ordre d'environ 0% à 20% est appréhendée. L'augmentation des températures est aussi au cœur des préoccupations liées aux changements climatiques et, selon les régions géographiques du Québec, les saisons et les horizons considérés, une augmentation de celles-ci de 1 à 6% peut être anticipée. Ces résultats sont fonction, entre autres, des scénarios d'augmentation de gaz à effet de serre et des modèles utilisés pour effectuer les simulations. Néanmoins, les changements anticipés de ces deux paramètres climatiques (températures et précipitations) sont susceptibles d'affecter de manière significative l'environnement bâti et les infrastructures au Québec. Les chaussées sont des structures particulièrement sensibles aux effets climatiques et il est anticipé que les changements climatiques pourraient grandement influencer leur comportement.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont permis de montrer les effets que pourraient avoir les changements climatiques sur les structures de chaussées flexibles. Les essais et analyses ont été concentrés sur l'effet de l'augmentation des précipitations sur la performance en orniérage, ainsi que sur l'effet de l'augmentation des températures sur le comportement au gel et en contexte de gel et dégel partiels (redoux hivernaux). Le projet de recherche a été réalisé à l'aide de plusieurs outils, notamment des simulations climatiques adaptées fournies par les experts du consortium Ouranos, des données de stations climatiques, des essais de laboratoire (module réversible, déformation permanente et simulateur de charge) et des logiciels de simulations (Temp/W et Chaussées2). Les conclusions tirées des résultats de cette étude sont les suivantes :

- Les changements climatiques auront des effets positifs (diminution de l'indice de gel de l'air en hiver) et des effets négatifs (augmentation de nombre de redoux hivernaux susceptibles de provoquer des

problèmes de performance en orniérage de la fondation et de fissuration de fatigue des couches de revêtement);

- Il est possible de relier les teneurs en eau dans les sols de chaussées aux précipitations et une relation a été développée dans le cadre de ce rapport afin de mettre en lien la teneur en eau dans les sols avec l'augmentation prévue des précipitations;
- Il existe une relation entre l'indice de gel de l'air et le nombre de redoux hivernaux subits par une chaussée flexible;
- La perte de durée de vie des ouvrages routiers varie de 0 à 15%, 7 à 10% et 3 à 9% pour l'effet de l'augmentation des précipitations sur l'orniérage des chaussées, pour la déformation permanente due aux redoux hivernaux et la fissuration par fatigue, respectivement;
- Les effets négatifs des changements climatiques semblent plus importants pour la zone 3 et les moins élevés pour la zone 1 pour l'orniérage dû à l'augmentation des précipitations;
- L'effet des redoux hivernaux est similaire d'une zone géographique à l'autre, mais le dommage relatif le plus élevé est mesuré pour la zone 2c;
- La zone 2c est aussi celle qui montre le dommage relatif le plus important en termes de fissuration par fatigue;
- L'augmentation des températures hivernales est associée à une diminution de l'indice de gel de l'air en hiver, une diminution de la profondeur de gel, une diminution des soulèvements hivernaux et une diminution du taux de dégradation de l'Indice de Rugosité Internationale (IRI) des chaussées flexibles;
- L'adoucissement prévu des températures hivernales permet de suggérer, dans certaines situations, une diminution de l'épaisseur de la sous-fondation des chaussées flexibles, celle-ci étant dimensionnée entre autres pour contrer les effets du gel;
- Une méthodologie de correction pour la sélection de l'indice de gel de l'air a été proposée et celle-ci permet, sur la durée de vie de la chaussée, d'obtenir un dommage équivalent total par rapport aux conditions de référence décrites dans le cadre de ce rapport.

## 8 Bibliographie

---

American Association for State Highway and Transportation Officials 1993. Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway Officials.

Bilodeau, J.-P. and Doré, G. and Schwarz, C. 2011. Effect of seasonal frost conditions on the permanent strain behaviour of compacted unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(5): 507-518.

Carrera, A., Dawson, A., & Steger, J. (2009). Report N 1: State Of The Art Of Likely Effect Of Climate On Current Roads. ITRB. University Of Nottingham, Nottingham. United Kingdom.

Caya, D. and R. Laprise, 1999: A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM, *Mon. Wea. Rev.*, 127(3), 341-362.

Chaumont, R.D., Brown, R.D., 2010. Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le Sud du Québec,” *Revue Routes – Road*, no. 345, premier trimestre 2010, pp. 78-83.

Deblois, K. 2005. Analyse du comportement saisonnier de planches expérimentales et validation du nouvel indice d'affaiblissement au dégel: Projet St-Célestin (phase III). Département de génie civil, Université Laval, Québec.

De Elía, R., and H. Côté , 2010: Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorol. Z.*, Vol. 19, No. 4, 325-339. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0469.

DesJarlais, C., Allard, M., Blondot, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R. et Villeneuve, C., 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Consortium Ouranos, Montréal, 2010, 130 p.

Doré, G. 2004. Development and validation of the thaw weakening index. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(4):185-192.

Doré, G., Zubeck, H., 2009. *Cold Regions Pavement Engineering*, ASCE PRESS, Novembre 2008, 416 p.

Doré, G., Drouin, P., Pierre, P. Desrochers, P. and Ullidtz, P. 2006. Estimation of the Relationships of Flexible Pavement Deterioration to Traffic and Weather in Canada.

Flato, G.M. and G.J. Boer, 2001: Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res.Lett.*, 28, 195-198.

Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader, and A.J. Weaver. 2000: The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. *Climate Dynamics*, 16:451-467.

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Da, X., Maskell, K. and Johnson, C.A., editors (2001): *Climate change 2001: the scientific basis; contribution of Working*

Huurman, M. 1997. Permanent deformation in concrete block pavements. Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, the Netherlands.

Juneau S., Pierre P. 2008. Développement d'un simulateur routier de sollicitations mécaniques et climatiques en laboratoire. Congrès annuel 2008 de la Société Canadienne de Génie civil, Québec.

Jungclaus, J.H., M. Botzet, H. Haak, N. Keenlyside, J.-J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz, and E. Roeckner, 2006: Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *J. Clim.*, vol 19(16), 3952–3972.

Konrad, J.-M. 1994, Développement et validation d'un modèle prévisionnel bi-dimensionnel du comportement des chaussées, Volume 1, Rapport GCS-94-07, Département de génie civil, Faculté de sciences et génie, Université Laval, Québec, Canada, Annexe A2.

Konrad, J.M., et Roy, M., 2000. Flexible pavements in cold regions: a geotechnical perspective, *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 689–699.

Korkiala-Tanttu, L. and Dawson, A. 2007. Relating full-scale pavement rutting to laboratory permanent deformation testing. *International journal of pavement engineering*, 8(1), 19-28.

Laprise, R. 2008: Regional climate modelling. *J. Comput. Physics.* 227(7), 3641-3666. doi:10.1016/j.jcp.2006.10.024

McFarlane, N.A., J. F. Scinocca, M. Lazare, R. Harvey, D. Verseghy, and J. Li, 2005: The CCCma third generation atmospheric general circulation model. CCCma CCCma Internal Report, 25 pp

Mills, B. and Andrey, J. (2002): Climate change and transportation: potential interactions and impacts; in *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*, proceedings of a workshop held at the Brookings Institution, Washington, D.C., United States Department of Transportation.

Music B. and D. Caya, 2007. Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydrometeorology*, 8(5), 969-988. DOI: 10.1175/JHM627.1.

Nakicenovic N, S Swart et al (2000) IPCC special report on emissions scenarios : a special report of Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p 599.

Royal Commission on National Passenger Transportation, 1992. Analyse des propositions sur le réseau routier national, RR-12

Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey, and R. de Elia, 2006: Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM. *J. Clim.*, vol.19(13), 3112-3132.

Poupart, J., 2013. Comportement en déformation permanente des matériaux granulaires en conditions de gel et dégel saisonnier. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.

Saint-Laurent, D. 2006. CHAUSSÉE2 – Logiciel de dimensionnement des chaussées souples : guide de l'utilisateur. Service des chaussées, Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, 78 p.

Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, and D. Plummer, 2008: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*,8, 7883-7930. [www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/7883/2008/](http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/7883/2008/).

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. GIEC, Groupe d'Expert Intergouvernemental d'Étude sur le Climat, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Thiam, P. M. 2014. *Effets des futurs changements climatiques sur la performance à long terme des chaussées souples au Québec*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.