

**ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN
POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT
COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
CC29.1**

Jean-Pascal Bilodeau
Quentin Félix Adam
Syrine Chabchoub
Erdrick Leandro Pérez-González
Université Laval

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec

Octobre 2025

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec et elle a été financée par le Ministère. Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec.

Collaborateurs

Laxmi Sushama, Professeure, Université McGill
Tarek Dukhan, Université McGill
Vincent Poitras, Université McGill

Comité de Suivi :

Guy Doré. Professeur émérite, Université Laval
Jean-Pascal Bilodeau. Professeur agrégé, Université Laval
Olivier Sylvestre. Chargé de projet, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
Laxmi Sushama. Professeure, Université McGill
Guy Bergeron. DGLC, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
Denis Saint-Laurent. DGLC, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
Félix Doucet. DGLC, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
Julie Roby. DGLC, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
Corina Nicorici. Conseillère à la recherche, ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec

REMERCIEMENTS ET NOTE SUR LES AUTEURS

Ce rapport technique a été réalisé dans le cadre du projet « Étalonnage du logiciel AASHTOWARE Pavement ME Design pour le dimensionnement des chaussées en tenant compte des changements climatiques CC29.1 » mené par l'Université Laval en collaboration avec le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD). Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes et organisations qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nous remercions tout particulièrement les représentants du MTMD pour leur accompagnement, leur disponibilité et la qualité de suivi tout au long du projet. Leur expertise et leurs commentaires pertinents ont grandement enrichi notre réflexion et orienté nos analyses.

Nous souhaitons également souligner la contribution de l'équipe des chercheurs (es) de l'Université Laval dont leur collaboration active et engagement a été essentiel à la réalisation de ce rapport :

Quentin Félix Adam est ingénieur civil et occupe actuellement le poste de chef de groupe de recherche à l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle en Allemagne, où il se consacre à la numérisation basée sur la physique et aux jumeaux numériques. Il a obtenu son doctorat à l'université technique du Danemark et un double master en ingénierie à l'université technique de Dresde et à l'École spéciale des travaux publics. Auparavant, Quentin a été chercheur postdoctoral à l'Université Laval au Canada d'octobre 2022 à mai 2023. À ce poste, il a contribué à la création de la base de données du Québec destinée à être utilisée dans AASHTOWare. Au cours de sa carrière, il a également obtenu une bourse de recherche Marie Skłodowska-Curie à l'université de Cambridge.

Jean-Pascal Bilodeau est professeur agrégé au Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval. Ingénieur géologue de formation, il détient un doctorat en géotechnique routière obtenu en 2009 à la même université. Spécialiste des infrastructures de transport en climat froid, il dirige la Chaire de recherche Sentinelle Nord sur les infrastructures nordiques. Il a reçu plusieurs prix d'enseignement et est reconnu pour ses recherches en géotechnique, pergélisol et ingénierie routière. Il a aussi contribué à la formation de nombreux étudiants aux cycles supérieurs et collabore activement avec des chercheurs au Canada et à l'international.

Syrine Chabchoub occupe actuellement le poste de conseillère technique en mécanique des chaussées chez VINCI Construction, où elle met à profit son expertise en ingénierie routière et en modélisation des structures de chaussées. Elle est docteure en génie civil et membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec (CPI). Elle a obtenu son doctorat à l'École Polytechnique de Tunisie, avec une partie expérimentale réalisée à l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal en 2017. Elle a ensuite poursuivi ses travaux de recherche en tant que chercheuse postdoctorale à l'Université Laval, de septembre 2023 à mars 2025, période durant laquelle elle a contribué à la calibration des modèles de performance pour les chaussées flexibles au Québec dans le logiciel AASHTOWare Pavement ME Design. Elle a également mené une étude approfondie sur l'impact des changements climatiques sur les chaussées flexibles dans la province, en se projetant sur un horizon de 80 ans, afin d'anticiper les effets du climat futur sur la durabilité des infrastructures routières.

Erdrick Pérez-González est professeur adjoint au Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval. Ingénieur civil formé au Venezuela, il détient une maîtrise en informatique appliquée et un doctorat en génie civil de l'Université Laval. Spécialiste en géotechnique des

barrages et chaussées, ses recherches portent sur les effets des charges dynamiques sur les matériaux granulaires. Il a contribué à des outils comme i3CME et i3CSHL, et participe à la Chaire CRSNG–Hydro-Québec sur les barrages en remblai. Auteur de plus de 20 publications scientifiques, il est membre de l'Ordre des ingénieurs du Québec et de la Société canadienne de géotechnique.

Enfin, nous remercions l'Université McGill et la professeure Laxmi Sushama pour sa contribution au projet, notamment pour les simulations climatiques.

Ce travail est le fruit d'un effort collectif, et nous espérons qu'il contribuera à l'amélioration continue des pratiques en matière de conception et de gestion des infrastructures routières au Québec.

SOMMAIRE

La conception des chaussées souples repose depuis longtemps sur des approches empiriques, largement documentées dans la littérature technique. Bien que ces méthodes aient permis de développer des modèles de dimensionnement, elles se révèlent souvent insuffisantes pour représenter fidèlement le comportement réel des chaussées dans des conditions variées. Cette limite appelle à une révision des pratiques de conception, en intégrant des approches plus robustes, notamment la méthodologie mécaniste-empirique.

Au Québec, le ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) utilise principalement la méthode empirique AASHTO 1993 pour le dimensionnement structural des chaussées. Cette méthode est complétée par une approche mécaniste pour évaluer les effets du gel en hiver. Dans le cadre du projet présenté ici, le MTMD cherche à tirer parti des avantages de l'approche mécaniste-empirique, en s'appuyant sur le logiciel AASHTOWare Pavement M-E Design, afin de mieux intégrer les particularités climatiques du Québec dans la conception des chaussées.

Le logiciel Pavement M-E Design est initialement calibré à partir des données du programme américain Long-Term Pavement Performance (LTPP). Or, ces données ne reflètent pas adéquatement les conditions québécoises, ce qui limite la précision des prédictions. Une calibration locale s'est donc imposée pour adapter les modèles aux réalités du terrain. Pour ce faire, l'outil Calibration Assistance Tool (CAT) intégré au logiciel a été utilisé pour ajuster quatre modèles de performance :

- la fissuration longitudinale par fatigue,
- l'orniérage total,
- la fissuration transversale,
- et l'indice de rugosité internationale (IRI).

Cette calibration s'est appuyée sur une démarche itérative, conforme aux guides de l'AASHTO. Plusieurs simulations ont été réalisées, avec ajustement progressif des coefficients de calibration, afin d'améliorer la précision des prédictions. Les critères statistiques utilisés incluaient le biais, l'erreur type, le coefficient de détermination R^2 et la p-value associée à l'hypothèse nulle. Pour réaliser cette calibration, 226 sections de chaussées souples ont été sélectionnées à travers le Québec, en se basant sur les bases de données du MTMD. Les critères de sélection comprenaient :

- la longueur des sections,
- l'âge du revêtement,
- la qualité et la pertinence des données disponibles,
- les niveaux de trafic (faible, moyen, élevé),
- et l'appartenance à l'une des trois zones climatiques définies pour le Québec (zones 1, 2 et 3).

Les résultats ont montré que les modèles calibrés localement pour la fissuration longitudinale, l'orniérage et l'IRI offrent des prédictions nettement plus fiables que celles obtenues avec le calibrage global. En revanche, le modèle de fissuration transversale demeure inadapté aux conditions québécoises, ce qui justifie le développement d'un modèle spécifique.

Le processus de validation des modèles a été automatisé par l'outil CAT, selon la règle de répartition 80/20 : 80 % des sections pour la calibration, 20 % pour la validation. Les résultats ont

confirmé la fiabilité des modèles calibrés localement, avec une bonne dispersion des données autour de la ligne d'égalité et des indicateurs statistiques améliorés.

Le deuxième objectif du projet consistait à évaluer l'impact des changements climatiques sur la performance à long terme des chaussées souples au Québec. Cette analyse s'est appuyée sur des projections climatiques couvrant une période de 80 ans, de 1989 à 2069.

En plus du scénario de référence MERRA2 (intégré par défaut dans le logiciel), deux scénarios climatiques futurs ont été utilisés :

- RCP4.5, représentant un scénario de stabilisation,
- RCP8.5, correspondant à un scénario pessimiste.

Ces bases de données climatiques ont été développées par l'Université McGill. Des fichiers horaires (.hcd) ont été générés sous MATLAB, contenant cinq paramètres physiques : température de l'air, couverture nuageuse, vitesse du vent, humidité relative et précipitations. Chaque fichier est associé à une station météorologique, intégrée dans le logiciel PMED pour les simulations. Six stations ont été créées pour représenter les différentes conditions du Québec en matière de trafic, types de sols et zones climatiques.

Les simulations ont révélé plusieurs tendances sur un horizon de 80 ans :

- Hausse des températures, entraînant des hivers plus doux et une réduction de la profondeur de gel.
- Diminution des précipitations, ce qui pourrait réduire l'humidité dans les couches de chaussée et abaisser les niveaux de la nappe phréatique.
- Réduction du nombre de cycles gel-dégel et de l'indice de gel, avec des effets potentiellement positifs sur la durabilité hivernale.
- Augmentation de la vitesse du vent et du couvert nuageux, par rapport au climat de référence.

Ces changements climatiques devraient avoir plusieurs effets sur la performance des chaussées :

- Réduction de la fissuration longitudinale par fatigue, attribuable à une moindre infiltration d'eau liée à la baisse des précipitations et du gel.
- Diminution de l'orniérage total, malgré une hausse des températures, en partie grâce à un refroidissement en surface causé par le vent et le couvert nuageux, qui modifie la rigidité de l'enrobé.
- Amélioration de l'indice de rugosité internationale (IRI), cohérente avec la réduction de la fissuration et de l'orniérage.

En revanche, aucun changement significatif n'a été observé pour la fissuration transversale, dont les valeurs sont restées constantes quel que soit le scénario climatique. Cela confirme l'inadéquation du modèle actuel et renforce la nécessité de développer un modèle adapté aux conditions québécoises.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

De façon générale, l'étude a démontré une amélioration de la prédiction des performances des chaussées souples au Québec pour trois indicateurs de performance: la fissuration longitudinale en piste de roues (FC), l'orniérage (O), et l'indice de rugosité internationale (IRI) par rapport à celles obtenues avec les modèles globaux, principalement fondés sur la base des données LTPP (Long Term Performance Pavement).

La fissuration transversale (FT) a révélé une inadéquation du modèle, actuellement intégré dans AASHTOWare PMED, aux conditions québécoises. Il est donc recommandé de développer une loi d'endommagement spécifique, mieux adaptée aux conditions climatiques, géotechniques et de trafic du Québec.

Par ailleurs, il est important de souligner les limites de la matrice expérimentale générée dans PMED. Celle-ci repose sur des seuils prédéfinis qui ne peuvent pas être modifiés par l'utilisateur, ce qui restreint la capacité à adapter les analyses aux spécificités régionales. Ces seuils influencent directement la modulation de la matrice expérimentale, en filtrant les sections selon des plages de valeurs fixes pour le trafic, la température et l'épaisseur des couches, etc. Il est donc fortement recommandé d'initier une collaboration avec ARA ou toute autre entité responsable du développement de PMED, afin d'obtenir la possibilité de moduler ces seuils selon les spécificités de chaque région.

L'étude a également évalué l'impact des changements climatiques sur la performance des chaussées souples au Québec sur un horizon de 80 ans (1989–2069), en utilisant des projections climatiques. Les résultats indiquent que les hivers plus doux attendus dans le sud du Québec pourraient réduire les cycles gel-dégel et l'indice de gel, avec un impact potentiellement bénéfique sur les chaussées. Les précipitations hivernales devraient également diminuer, bien que les tendances varient selon les régions et les saisons.

En termes de modèles de prédiction, une réduction de la fissuration longitudinale de fatigue, l'orniérage et de l'indice de rugosité internationale est anticipée à long terme.

Il est important de noter que cette évaluation ne permet pas de quantifier l'impact des événements climatiques extrêmes, mais uniquement celui des grandes tendances. Il serait donc pertinent, dans le cadre d'un futur projet, d'évaluer spécifiquement l'effet de ces événements extraordinaires sur les chaussées souples et de quantifier la résilience des infrastructures routières.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	18
1.1 BÉNÉFICES ATTENDUS POUR LE MINISTÈRE.....	19
1.2 OBJECTIFS	19
1.2.1 <i>Objectif général</i>	19
1.2.2 <i>Objectifs spécifiques</i>	19
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	21
2.1 APPROCHE GÉNÉRALE DE LA CONCEPTION MÉCANISTE-EMPIRIQUE	21
2.1.1 <i>Climat</i>	22
2.1.2 <i>Trafic</i>	24
2.1.3 <i>Propriétés des matériaux de la chaussée</i>	26
2.1.4 <i>Indicateurs de performance (lois d'endommagement)</i>	27
2.2 OUTIL D'ANALYSE D'ÉTALONNAGE (CAT)	38
2.3 INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES CHAUSSÉES	41
2.3.1 <i>Les zones climatiques de la province de Québec</i>	43
2.3.2 <i>Scénarios de changement climatique</i>	45
2.3.3 <i>Prise en compte du changement climatique dans la conception des chaussées</i> ..	46
2.4 DISCUSSION	47
3. MÉTHODOLOGIE.....	50
3.1 DÉFINITION DES SECTIONS DE CHAUSSÉE DE RÉFÉRENCE POUR L'ÉTUDE.....	51
3.1.1 <i>Caractérisation des matériaux et du trafic des sections de référence</i>	51
3.1.2 <i>Évaluation de performance des chaussées pour identifier les anomalies</i>	52
3.2 ÉTALONNAGE DES MODÈLES DE PERFORMANCE DANS LE LOGICIEL AASHTOWARE PMED52	
3.3 ESTIMATION DES VARIABLES CLIMATIQUES AFFECTÉES PAR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	52
3.3.1 <i>Définition des zones climatiques</i>	53
3.4 PROJECTION CLIMATIQUE POUR ANALYSER L'IMPACT DU CLIMAT FUTUR SUR LES	
PERFORMANCES DES CHAUSSÉES.....	53
3.4.1 <i>Quantification de l'effet des changements climatiques sur les chaussées dans la</i>	
<i>province de Québec</i>	53
4. ZONES CLIMATIQUES SUR LA BASE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	54
4.1 SENSIBILITÉ AUX VARIABLES CLIMATIQUES	54
4.2 MODÈLES CLIMATIQUES ET SIMULATIONS.....	56
5. ÉCHANTILLONNAGE DES SECTIONS DE RÉFÉRENCE POUR L'ÉTALONNAGE DU	
LOGICIEL AASHTOWARE PMED	59
5.1 MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION.....	59
5.1.1 <i>Critères de base</i>	59
5.1.2 <i>Évaluation des informations disponibles dans les sections</i>	60
5.1.3 <i>Évaluation des performances mesurés sur le terrain</i>	61
5.2 CALCUL DES INDICATEURS DE PERFORMANCE.....	63
5.2.1 <i>Fissuration</i>	64
5.2.2 <i>Déformations de la surface</i>	65

5.2.3	<i>Indice de confort au roulement</i>	65
5.2.4	<i>Critères de cohérence des performances calculées</i>	65
5.3	SECTIONS DE RÉFÉRENCE RETENUES.....	66
5.4	STATISTIQUES SUR LES SECTIONS RETENUES POUR L'ÉTALONNAGE.....	70
5.4.1	<i>Fréquence des matériaux dans les sections de référence</i>	72
5.5	IMPORTATION.....	74
6.	NIVEAU DE PRÉCISION DES DONNÉES D'ENTRÉE.....	75
6.1	CONTEXTE.....	75
6.2	MATÉRIAUX DE CHAUSSÉE.....	75
6.2.1	<i>Enrobé bitumineux (EB)</i>	75
6.2.2	<i>Matériaux granulaires non liés et matériaux recyclés</i>	79
6.2.3	<i>Sols</i>	83
6.3	TRAFIC.....	86
6.3.1	<i>Distribution et croissance des classes de véhicules</i>	87
6.4	INFORMATIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	91
7.	ÉTALONNAGE DES MODÈLES DE PERFORMANCE DANS LE LOGICIEL AASHTOWARE PMED.....	92
7.1	EXAMEN PRÉLIMINAIRE DES DONNÉES.....	92
7.2	OPTIMISATION DES COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE LOCAUX POUR LES CHAUSSÉES SOUPLES AU QUÉBEC.....	93
7.2.1	<i>Coefficients d'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue</i>	94
7.2.2	<i>Coefficients d'étalonnage pour l'Orniérage</i>	98
7.2.3	<i>Coefficients d'étalonnage pour la Fissuration Transversale</i>	102
7.2.4	<i>Coefficients d'étalonnage pour l'Indice de Rugosité Internationale</i>	105
7.2.5	<i>Synthèse des coefficients d'étalonnage locaux</i>	108
7.3	VALIDATION.....	110
7.3.1	<i>Validation du modèle de la fissuration longitudinale de fatigue</i>	110
7.3.2	<i>Validation du modèle d'Orniérage</i>	111
7.3.3	<i>Validation du modèle de l'Indice de Rugosité Internationale</i>	112
8.	QUANTIFICATION DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PERFORMANCE DES CHAUSSÉES AU QUÉBEC.....	115
8.1	CRITÈRE DE CHOIX DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	115
8.2	ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES SUR UN HORIZON DE 80 ANS.....	116
8.3	ANALYSE DE LA FISSURATION LONGITUDINALE DE FATIGUE SUR UN HORIZON DE 80 ANS ..	118
8.4	ANALYSE DE L'ORNIÉRAGE SUR UN HORIZON DE 80 ANS.....	119
8.5	ANALYSE DE L'IRI SUR UN HORIZON DE 80 ANS.....	120
8.6	ANALYSE DE LA FISSURATION TRANSVERSALE SUR UN HORIZON DE 80 ANS.....	121
9.	CONCLUSIONS.....	122
10.	RÉFÉRENCES.....	125
ANNEXE A.....	130	
A.1	INTRODUCTION.....	131
A.2	CLIMATE MODELS AND SIMULATIONS.....	131
A.3	VALIDATION.....	133
A.4	PROJECTED CHANGES.....	135
A.5	ASSESSMENT OF THE VALIDITY OF THE CLIMATIC ZONES (FOR DISCUSSION).....	136
A.6	REFERENCES.....	137

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES
CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

A.7	APPENDIX A:.....	138
A.8	APPENDIX B:.....	141
ANNEXE B	.....	143
ANNEXE C	.....	160
C.1	INTRODUCTION.....	161
C.2	MODULE RÉVERSIBLE.....	161
C.3	GRANULOMÉTRIE.....	164
C.4	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	167
ANNEXE D	.....	168
ANNEXE E	.....	212
E.1	COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE POUR LA FISSURATION LONGITUDINALE DE FATIGUE.....	213
E.2	COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE POUR L'ORNIÉRAGE.....	216
E.3	COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE POUR LA FISSURATION TRANSVERSALE.....	219
E.4	COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE POUR L'INDICE DU RUGOSITÉ INTERNATIONALE.....	220

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indicateurs de performance des chaussées et leurs valeurs limites acceptables (AASHTO, 2020a) et MTMD (2018).....	22
Tableau 2 : Équations pour le calcul de βf_1 par rapport à HAC	30
Tableau 3 : Équations pour le calcul de CH par rapport à HAC	31
Tableau 4 : Paramètres d'étalonnage α_1 et α_2 - Coefficients globaux (AASHTO, 2020b).....	34
Tableau 5 : Types de fissures de fatigue les plus probables selon le paramètre DIE	36
Tableau 6 : Équations pour le calcul de kt par rapport à MAAT	37
Tableau 7 : Erreur tolérable pour chaque indicateur de performance (AASHTO, 2010).....	51
Tableau 8 : Stations météorologiques utilisées comme référence dans l'étude de sensibilité	54
Tableau 9 : Plage de modification des variables climatiques pour l'analyse de sensibilité	55
Tableau 10 : Simulations considérées dans cette étude	56
Tableau 11 : Critères généraux pour la sélection des sections de référence	59
Tableau 12 : Couleurs utilisées pour représenter l'indice d'état	60
Tableau 13 : Statistiques sur les projets sélectionnés en termes de trafic et des zones climatiques	71
Tableau 14 : Nombre de sections par classe fonctionnelle et par indicateur de performance	71
Tableau 15 : Nombre de sections par classe fonctionnelle et par zone climatique.....	71
Tableau 16 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (enrobé bitumineux) .	73
Tableau 17 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (fondation)	73
Tableau 18 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (sous-fondation).....	73
Tableau 19 : Évolution des enrobés au Québec (Paradis, 2015)	76
Tableau 20 : Proportion de types d'EB dans les sections de référence par rapport à la spécification	76
Tableau 21 : Module dynamique des enrobés (Doucet, 2014).....	77
Tableau 22 : Coefficients de régression du modèle de Witczak au Québec (Doucet & Auger, 2012).....	78

Tableau 23 : Propriétés typiques des enrobés bitumineux au Québec	79
Tableau 24 : Valeurs de module de cisaillement du bitume	79
Tableau 25 : Module réversible des matériaux granulaires selon le type de matériau granulaire et d'ajout (Doucet, 2014)	81
Tableau 26 : Propriétés des matériaux granulaires (TAC, 2020)	81
Tableau 27 : Valeurs de module réversible (Mr) pour les matériaux de fondation	82
Tableau 28 : Modules réversibles et coefficients de Poisson réversibles des matériaux recyclés (Moniz et al., 2013).....	82
Tableau 29 : Propriétés des matériaux recyclés (MR)	83
Tableau 30 : Équivalence entre matériaux utilisés comme fondations et sous-fondations	83
Tableau 31. Classification des sols pour l'étalonnage AASHTOware PMED	84
Tableau 32 : Caractéristiques du trafic utilisé dans l'analyse de sensibilité.....	85
Tableau 33 : Structure de chaussée de référence	85
Tableau 34 : Niveau hiérarchique pour les variables de trafic.....	86
Tableau 35 : Tableau des ajustements mensuels (Houimli et al., 2017)	88
Tableau 36 : Distribution des groupes d'essieux pour chaque classe de camions (Houimli et al., 2017).....	88
Tableau 37 : Informations sur les stations WIM	90
Tableau 38 : Valeurs CAM par défaut en l'absence de données de classification des véhicules (St-Laurent, 2006b, 2006a)	90
Tableau 39 : Sélection de la station WIM et du CAM correspondant par classe de route et pourcentage de véhicules lourds	91
Tableau 40 : Vérification des exigences en termes des valeurs d'endommagement mesurées maximales moyennes.....	93
Tableau 41 : Coefficients d'étalonnage globaux pour la fissuration longitudinale de fatigue	95
Tableau 42 : Résumé de l'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue avec les coefficients globaux.....	96
Tableau 43 : Optimisation des coefficients d'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue	97
Tableau 44 : Coefficients d'étalonnage globaux pour l'orniérage.....	98

Tableau 45 : Résumé de l'étalonnage pour l'orniérage avec les coefficients globaux.....	99
Tableau 46 : Optimisation des coefficients d'étalonnage pour l'Orniérage.....	100
Tableau 47 : Exemples de quelques combinaisons impliquant à la fois les coefficients $\beta s1$ et $\beta sg1$	100
Tableau 48 : Coefficients d'étalonnage globaux pour la Fissuration Transversale (Vérification initiale).....	102
Tableau 49 : Résumé de l'étalonnage pour la Fissuration Transversale avec les coefficients globaux (Vérification initiale).....	103
Tableau 50 : Résumé de l'étalonnage pour l'IRI avec les coefficients globaux	107
Tableau 51 : Synthèse des coefficients d'étalonnage locaux pour les chaussées souples au Québec	109
Tableau 52 : Nombre de sections retenues pour la validation.....	110
Tableau 53 : Résumé des mesures statistiques pour la fissuration longitudinale de fatigue	111
Tableau 54 : Résumé des mesures statistiques pour l'Orniérage	112
Tableau 55 : Résumé des mesures statistiques pour l'Indice de Rugosité International	113
Tableau 56 : Caractéristiques des projets sélectionnés pour la présentation du climat futur au Québec	116
Tableau 57 : Évolution des valeurs climatiques en fonction des différents scénarios.....	118
Tableau 58 : Évolution de la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des différents scénarios climatiques	119
Tableau 59 : Évolution de l'Orniérage en fonction des différents scénarios climatiques	120
Tableau 60 : Évolution de l'IRI en fonction des différents scénarios climatiques.....	121
Tableau 61 : Évolution de la Fissuration Transversale en fonction des différents scénarios climatiques	121

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme de masse des essieux pour les véhicules de la classe 4, station de référence : l'Ange-Gardien. (a) essieu simple, (b) essieu tandem.....	26
Figure 2 : Trois modes de sollicitation d'une fissure. (a) mode l'ouverture, (b) mode II, cisaillement dans le plan et, (c) mode III, action hors du plan. (AASHTO, 2020b)	33
Figure 3 : Diagramme détaillé du processus d'étalonnage du CAT (AASHTO, 2019).....	39
Figure 4 : Délimitation des zones nord et sud de la province de Québec (MTMD, 2015).....	43
Figure 5 : Carte des zones de dégel (MTMD, 2013)	44
Figure 6 : Zones climatiques pour le choix des classes de bitume pour chaussée souple (MTMD, 2018).....	44
Figure 7 : Zonage climatique proposé par Perron-Drolet (2015).....	45
Figure 8 : Interaction des étapes de la méthodologie proposée pour le projet	50
Figure 9 : Sensibilité des indicateurs de performance aux variables climatiques	55
Figure 10 : Température annuelle moyenne et indice de gel obtenu à partir de GEM10 pour les périodes actuelles 1991-2020 et futures 2041-2070, et leurs taux de changement.....	57
Figure 11 : (a) Zones actuelles définies par le MTMD pour la sélection du bitume, (b) modifications potentielles de ces zones en tenant compte des caractéristiques climatiques futures	58
Figure 12 : Zones climatiques considérées pour la province de Québec	58
Figure 13 : Répartition des sections dans la province de Québec	60
Figure 14 : Conditions dans les sections de référence. (a) intersection de deux routes, (b) présence de courbes prononcées, (c) présence de ponts et, (d) segment dans des conditions souhaitables	61
Figure 15 : Critères relatifs à l'intervalle de temps à utiliser pendant le processus d'étalonnage.....	62
Figure 16 : Informations affichées dans le logiciel de visualisation MTMD-CAT	63
Figure 17 : Numérotation des bandes de la chaussée pour l'auscultation des fissures. (a) représentation des bandes sur la route (Bernard & Brodeur, 2002), (b) échantillon de mesure réel.....	64
Figure 18 : Élimination des valeurs extrêmes dans les mesures sur le terrain	66
Figure 19 : Statistiques sur les sections de référence pour chaque type de dégradation.....	66
Figure 20 : Exemple de critère de sélection : Manque d'informations (Projet 2).....	67

Figure 21 : Exemple de critère de sélection : Tendance atypique. (a) fissuration longitudinale de fatigue et Fissuration Transversale (Projet 13), (b) pour la fissuration longitudinale de fatigue, l'orniérage, la Fissuration Transversale et l'IRI (Projet 75) et, (c) pour la fissuration longitudinale de fatigue, l'orniérage, la Fissuration Transversale et l'IRI (Projet 53)	68
Figure 22 : Exemple de critère de sélection. (a) présence d'un pont au début du tronçon, (b) présence de géotextiles, (c) présence d'une couche isolante et, (d) intersection avec des voies ferrées.....	69
Figure 23 : Ajustement de l'allure de la courbe suite à un point aberrant se présentant au début de la variation de l'orniérage et de la fissuration transversale au cours du temps (Projet 11). (a) avant ajustement, (b) après ajustement.....	70
Figure 24 : Ajustement de l'allure de la courbe suite à un point aberrant se présentant à la fin de la variation de l'IRI au cours du temps (Projet 84). (a) avant ajustement, (b) après ajustement. .	70
Figure 25 : Indices de performance (IP) dans les différentes zones climatiques	72
Figure 26 : Variation de la prédiction de performance par rapport au sol A-1a ($M_r=124$ MPa)...	85
Figure 27 : DJMA dans les sections de référence.....	87
Figure 28 : Stations WIM avec diagrammes de masse connus (Martineau, 2012; Paquet, 2009)	89
Figure 29 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des coefficients d'étalonnage globaux	95
Figure 30 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des coefficients d'étalonnage locaux	98
Figure 31 : Valeurs mesurées et prédites dans l'outil CAT pour l'Orniérage en fonction des coefficients d'étalonnage globaux.....	99
Figure 32 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'Orniérage en fonction des coefficients d'étalonnage locaux.....	101
Figure 33 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la Fissuration Transversale en fonction des coefficients d'étalonnage globaux.....	103
Figure 34 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la Fissuration Transversale en fonction des coefficients d'étalonnage locaux.....	104
Figure 35 : Exemple de nuage de points dans le cas de la vérification initiale. (a) sans l'ajustement de l'IRI0, (b) avec l'ajustement de l'IRI0.....	106
Figure 36 : Corrélation de la valeur IRI0. (a) par une tendance exponentielle, (b) par une tendance linéaire	106
Figure 37 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'IRI en fonction des coefficients d'étalonnage globaux	107

Figure 38 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour l’IRI en fonction des coefficients d’étalonnage locaux	108
Figure 39 : Valeurs mesurées et prédites dans l’outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue. (a) Vérification initiale, (b) Étalonage local et, (c) Validation.....	111
Figure 40 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour l’Orniéage. (a) Vérification initiale, (b) Étalonage local et, (c) Validation	112
Figure 41 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour l’Indice de Rugosité Internationale. (a) Vérification initiale, (b) Étalonage local et, (c) Validation	113
Figure 42 : Emplacements des stations météorologiques.....	116
Figure 43 : Évolution de la vitesse du vent sur un horizon de 80 ans.....	117
Figure 44 : Évolution du couvert nuageux sur un horizon de 80 ans.....	118

GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS GÉNÉRALES

AASHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
TAC - ATC	-	Association des transports du Canada
CAT	-	Calibration Assistance Tool
EICM	-	Enhanced Integrated Climatic Model
GES	-	Gaz à effet de serre
IRI	-	Indice de rugosité international
MCG	-	Modèles climatiques globaux
M-E	-	Mécaniste-empirique
MEPDG	-	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
MRC	-	Modèles climatiques régionaux
MRCC	-	Modèle régional canadien du climat
MTMD	-	Ministère des Transports et de la Mobilité durable - Ministère
PMED	-	Pavement Mechanistic Empirical Design
ARA	-	Applied Research Associates

1. INTRODUCTION

Depuis plus d'une vingtaine d'années, la pratique courante en dimensionnement des structures de chaussées en enrobé au Québec est basée sur une adaptation de la méthode empirique AASHTO 93 (AASHTO, 1993), dont les premiers essais remontent au début des années 1960. L'approche développée permet d'établir les composantes d'une structure de chaussée afin d'assurer un comportement adéquat pendant la durée de vie escomptée de la chaussée. La validation et l'étalonnage d'une nouvelle méthode mécaniste-empirique (M-E) en implantation dans les pratiques nord-américaines permettraient entre autres une meilleure considération des conditions climatiques particulières qui prévalent au Québec, en plus d'offrir un bon potentiel pour la prise en compte des changements climatiques. En effet, la méthode de conception structurale actuelle se limite à subdiviser la province en deux zones climatiques (Sud et Nord), tandis que la nouvelle méthode M-E permet de simuler l'effet de la distribution horaire de la température, des précipitations, de l'ensoleillement, et de la vitesse des vents, en plus de tenir compte de la profondeur de la nappe phréatique.

Le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) dispose d'une méthode mécaniste très élaborée pour le contrôle des soulèvements au gel au moment de la conception (St-Laurent, 2006a). Toutefois, comme dans la majorité des organisations routières nord-américaines, le dimensionnement structural est encore basé sur la méthode empirique AASHTO 93 (AASHTO, 1993). L'implantation des méthodes de conception des chaussées M-E fait l'objet d'efforts importants partout dans le monde. Cette approche s'avère la pratique moderne et d'avenir dans le domaine du dimensionnement des chaussées. L'approche M-E vise à établir des liens entre les caractéristiques des matériaux composant une chaussée, les conditions climatiques et la sollicitation par le trafic, afin de prédire l'apparition et le développement de divers mécanismes de dégradation. Cette approche est plus complète que l'approche entièrement « Empirique ». Elle permet également de mieux considérer les particularités climatiques d'une région, et ainsi mieux quantifier les effets des changements climatiques sur la performance et la durée de vie de l'ouvrage.

Par ailleurs, le Ministère participe activement depuis plusieurs années aux travaux du sous-comité sur le dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées de l'Association des Transports du Canada (ATC). Divers constats issus des travaux de ce comité indiquent que l'implantation d'une telle approche dans la pratique passe entre autres, par un étalonnage des modèles de comportement inhérents à son usage. D'ailleurs, un logiciel a récemment été élaboré à la demande du Task Force pour aider les organisations routières à étalonner ces modèles, soit le Calibration Assistance Tool (CAT), outil complémentaire au logiciel AASHTOWare Pavement ME Design.

Les efforts déployés pour implanter les approches M-E dans le domaine des chaussées se traduisent par une meilleure caractérisation des matériaux, du trafic et du climat. Cette approche est à la fine pointe de la recherche dans ce domaine et vise notamment une meilleure optimisation des composantes d'une chaussée et la réalisation d'analyses de sensibilité en regard de divers changements, dont les conditions climatiques, ce qui est plus difficilement envisageable avec la méthode empirique actuelle.

Le projet de recherche vise donc à étalonner les modèles de comportement des chaussées souples utilisés par le logiciel AASHTOWare PMED à la l'aide du CAT par l'élaboration d'une base

de données de suivis du comportement de sections de chaussées du réseau routier supérieur du Ministère. Les données issues du système ministériel de gestion des chaussées GCH-6011 seront mises à profit.

Tous les indicateurs de performance caractérisant l'état et l'évolution du comportement des chaussées seront considérés dans la démarche.

1.1 Bénéfices attendus pour le ministère

Les modèles de comportement utilisés dans la méthode M-E adaptés au contexte et au climat québécois devraient permettre une meilleure prévision du comportement des chaussées souples exprimées selon différents indicateurs de performance, tels que le confort au roulement (IRI), la fissuration thermique, la fissuration de fatigue et l'orniérage. Le principal avantage de la méthode est de fournir aux concepteurs des outils pour évaluer le comportement à long terme de différentes options de conception et de réhabilitation, ainsi que l'impact des variations au niveau du climat et du trafic. Notons que l'implantation d'une telle méthode de dimensionnement est en accord avec les pratiques en usage au Ministère, ce qui contribuera à un transfert efficace des informations entre les divers intervenants œuvrant dans le domaine des chaussées.

La démarche menant à l'étalonnage des modèles de dégradations permettra de se familiariser avec les outils prévus à cet effet dans le logiciel AASHTOWare PMED dont le Ministère possède une licence d'utilisation. En utilisant l'outil de calibration des modèles d'endommagement (CAT), le Ministère sera à même d'en constater le potentiel pour optimiser les coefficients d'étalonnage des divers modèles de dégradations. Également, cette démarche permettra d'apprécier la validité des modèles en regard des comportements observés sur les sections d'essais du Québec.

1.2 Objectifs

1.2.1 Objectif général

Le principal objectif du projet de recherche est d'adapter aux différents contextes québécois et aux effets des changements climatiques les lois d'endommagement des chaussées souples du logiciel AASHTOWare Pavement ME Design à l'aide de l'outil d'étalonnage Calibration Assistance Tool.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques ont été actualisés en cours de réalisation du projet en fonction des contraintes rencontrées, des réajustements nécessaires par l'apprentissage des limites d'utilisation des outils et des choix stratégiques décidés par le comité de projet. Les objectifs spécifiques finaux sont :

- a. Assembler une base de données de comportement des chaussées souples afin de supporter l'étalonnage des lois d'endommagement.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES
CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

- b. Évaluer la précision des prédictions d'endommagement de la chaussée obtenues par le logiciel AASHTOWare PMED et ajuster au besoin les variables des modèles d'endommagement, afin d'obtenir la meilleure précision possible du logiciel à l'aide de l'outil d'étalonnage Calibration Assistance Tool.
- c. Simuler l'évolution des variables climatiques sous différents niveaux de changement climatique, jusqu'à l'année 2069.
- d. Analyser l'effet du changement climatique sur la durée de vie des chaussées souples du réseau routier Québécois.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

La chaussée est une structure linéaire multicouche dont le rôle est de permettre aux véhicules de circuler confortablement, économiquement et en toute sécurité. Les chaussées servent d'interface entre le trafic, le climat et le sol sous-jacent et remplissent une double fonction : de haut en bas, elles répartissent la charge et de bas en haut, elles atténuent divers effets géotechniques (Doré & Zubeck, 2009). Le système de couches typique d'une chaussée souple se compose d'une couche de surface en enrobé bitumineux, d'une couche de fondation constituée de granulats non traités et d'une couche de sous-fondation généralement constituée de matériaux locaux non traités. Ce système de couches est soutenu par un sol naturel modérément compacté (plateforme). Les épaisseurs requises pour chaque couche de la structure varient considérablement en fonction de variables telles que les propriétés des matériaux, le nombre et la configuration des charges des véhicules, les conditions environnementales et la durée de vie prévue de la structure (Huang, 2004).

La conception et l'analyse des chaussées ont traditionnellement été réalisées par des méthodes empiriques ou semi-empiriques, la méthode AASHTO93 (AASHTO, 1993) étant la plus diffusée et la plus utilisée. Cependant, passer de la méthode de conception précédente basée sur une approche empirique à des procédures de conception basées sur l'approche mécaniste-empirique (M-E) offre plusieurs avantages, tels qu'une gamme plus large de charges de véhicules, de propriétés de matériaux, d'effets climatiques et une plus grande fiabilité des prévisions de performance des chaussées (Maadani et al., 2021).

Les approches M-E utilisent des modèles de réponse structurale pour calculer les contraintes, les déformations et les déplacements dus à la charge du trafic et aux facteurs climatiques (température et humidité). Ces réponses sont ensuite utilisées dans des modèles de performance, qui sont des lois d'endommagement empiriques, pour calculer l'accumulation de dommages à tout moment pour des dégradations spécifiques, telles que la fissuration par fatigue ou l'orniérage structural (NCHRP, 2004). L'AASHTO a publié le *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) qui compile les informations nécessaires à l'utilisation de l'approche M-E pour la conception et l'analyse des chaussées. Ce guide est utilisable à l'aide du logiciel AASHTOWare Pavement ME Design (PMED) disponible commercialement (AASHTO, 2020a).

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse de l'approche M-E de la conception des chaussées, du processus d'étalonnage des modèles de performance des chaussées aux conditions locales et de la manière dont les changements climatiques peuvent affecter les chaussées. Ceci est fait en référence aux principes mis en œuvre dans le logiciel d'AASHTOWare PMED, en nous limitant au cas des chaussées souples.

2.1 Approche générale de la conception mécaniste-empirique

La procédure de conception, ou l'analyse M-E des chaussées, consiste à calculer la réponse structurale d'une chaussée soumise à une configuration de charge et à utiliser ces réponses pour calculer l'endommagement incrémental ou progressif. L'approche M-E comporte trois éléments de base : (1) la théorie de l'élasticité linéaire appliquée aux systèmes multicouches utilisés pour estimer la réponse critique de la chaussée (contraintes, déformations et déplacements) en fonction des conditions de chargement et des propriétés des matériaux, cet élément est la partie mécaniste de l'approche M-E; (2) les procédures de caractérisation des matériaux qui sont en

cohérence avec l'analyse mécaniste; et (3) les relations définies entre les paramètres critiques de réponse de la chaussée et le nombre de répétitions de charge pour l'atteinte de la fin de vie, ou fonction de transfert, qui correspondent à la partie empirique de l'approche M-E.

Le logiciel AASHTOWare Pavement ME Design est un outil de conception utilisé pour prédire la progression des principales dégradations et la perte de service de la chaussée au fil du temps à partir de l'approche M-E, puis les compare aux critères d'acceptabilité, en suivant les pratiques du MEPDG. C'est la base pour vérifier l'adéquation d'une chaussée candidate par rapport à la charge et aux exigences climatiques. Le logiciel AASHTOWare PMED comprend également un processus itératif automatisé pour l'optimisation des épaisseurs de chaussée.

Étant donné que le logiciel AASHTOWare PMED comprend des lois d'endommagement et des équations de régression pour étudier différents indicateurs de performance, des valeurs limites de performance acceptable sur la durée de vie de la chaussée peuvent être proposées pour la phase de conception. Cependant, dans l'approche M-E, ces valeurs peuvent être modifiées en fonction des exigences des administrations des réseaux routiers. Le Tableau 1 résume les valeurs proposées par l'AASHTO et le MTMD.

Tableau 1 : Indicateurs de performance des chaussées et leurs valeurs limites acceptables (AASHTO, 2020a) et MTMD (2018)

Indicateur de performance	Classe de route	Valeur de référence (AASHTO)	Seuil de déficience majeure (MTMD)
Fissuration (par le bas)	Autoroutes et routes nationales	10% de la surface	50 m /200m de bande de roues avec fissuration majeure
	Routes régionales	20% de la surface	
	Routes locales	35% de la surface	
Fissuration (par le haut)	Autoroutes et routes nationales	10% de la surface	80 m/100m de fissures de sévérité majeure
	Routes régionales	20% de la surface	
	Routes locales	35% de la surface	
Orniérage total	Autoroutes et routes nationales	10,2 mm	15 mm
	Routes régionales	12,7mm	
	Routes locales (< 72 km/h)	16,5 mm	
Fissuration thermique	Autoroutes et routes nationales	110 m/km	6 fissures transversales de sévérité majeure
	Routes régionales	150 m/km	
	Routes locales	150 m/km	
Uni de surface (IRI)	Autoroutes et routes nationales	2,9 m/km	3,5 m/km
	Routes régionales	3,6 m/km	4,0 m/km
	Routes locales	3,6 m/km	4,5 m/km
			5,0 m/km

2.1.1 Climat

Les variables climatiques seront d'un intérêt particulier dans ce projet. Les conditions environnementales sont prises en compte dans le logiciel AASHTOWare PMED afin d'obtenir des estimations plus précises de la réponse structurale de la chaussée au cours des différentes saisons, ou incréments de temps, considérés dans une année. À cette fin, le logiciel utilise le

modèle *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM), qui consiste en un modèle climatique général regroupant les trois modèles suivants :

- a. Le modèle climat-matériaux-structure (modèle CMS), développé par l'Université de l'Illinois.
- b. Le modèle CRREL de soulèvement et tassement dû au gel et au dégel, développé par l'US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- c. Le modèle d'infiltration et de drainage (modèle ID), développé par l'Université Texas A&M.

Pour la simulation de la réponse structurale des chaussées, le logiciel subdivise les différentes couches de la chaussée en sous-couches dont l'épaisseur dépend du type de matériau, de l'épaisseur de la couche et de la profondeur dans la structure de la chaussée. L'AASHTOWare PMED utilise l'EICM pour ajuster les modules des couches de la chaussée en fonction de la température et de l'humidité.

En supposant que la fréquence des températures dans les sous-couches d'enrobé est normalement distribuée, la température moyenne de chaque sous-couche par mois est utilisée pour déterminer son module dynamique en utilisant le modèle de Witczak. Le modèle de Witczak est décrit par l'équation sigmoïdale suivante (NCHRP, 2004) :

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

Où $|E^*|$ est le module dynamique, t_r est le temps de chargement à la température de référence, δ et α sont des paramètres d'ajustement pour un ensemble de données, et β et γ sont des paramètres décrivant la forme de la fonction sigmoïdale.

L'équation (2) fournit la forme générale des facteurs de translation.

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \quad (2)$$

Où, $a(T)$ est le facteur de translation en fonction de la température, et T est la température d'intérêt.

Le module dynamique est pris en compte dans le calcul des déformations verticales et horizontales à des profondeurs considérées comme critiques afin de déterminer la déformation permanente dans chaque couche et l'emplacement des dommages de fatigue dans les couches d'enrobé. Pour la fissuration transversale (non associée aux charges), l'EICM calcule la température de l'enrobé sur une base horaire, et utilise ces températures pour estimer les propriétés afin de calculer les contraintes de traction à la surface de la couche.

L'EICM calcule également la température de chaque sous-couche non liée et détermine les mois au cours desquels une sous-couche est gelée. Le module réversible des sous-couches gelées est alors augmenté pendant la période de gel, et diminué pendant la période d'affaiblissement du dégel. De la même manière, la teneur en eau mensuelle moyenne de ces couches non liées est calculée pour la période d'analyse. La teneur en eau mensuelle moyenne par rapport à la teneur en eau optimale est utilisée pour ajuster le module réversible de chaque sous-couche pour chaque mois de la période d'analyse. Des modèles auxiliaires pour le calcul des variations du module des matériaux affectés par le gel ou l'humidité sont intégrés dans l'EICM.

Des données météorologiques détaillées sont nécessaires pour prévoir les dommages aux chaussées avec le logiciel AASHTOWare PMED. Les enregistrements horaires des variables suivantes sont nécessaires pour le fonctionnement de l'EICM :

- a. Température horaire.
- b. Vitesse du vent.
- c. Ensoleillement.
- d. Précipitation.
- e. Humidité relative.

Les données climatiques horaires utilisée par le logiciel AASHTOWare PMED proviennent du modèle Modern Era Retrospective Reanalysis 2 (MERRA2) disponible en format compatible sur le site LTPP InfoPave du FHWA, qui contient des enregistrements climatiques depuis 1979 à tous les 50 km environ. Afin d'émuler la pratique de conception, les étalonnages seront effectués avec les données climatiques de MERRA2, en utilisant des stations virtuelles générées à partir des 707 cellules disponibles pour le Québec.

Il est important de noter que le logiciel AASHTOWare PMED prendra en compte les valeurs probables des variables météorologiques (basées sur les enregistrements climatiques). Toutefois, si la période d'analyse se situe dans les enregistrements climatiques, l'AASHTOWare PMED prendra directement en compte ces valeurs. Ainsi, afin de prendre en compte les changements climatiques dans le logiciel AASHTOWare PMED, les données climatiques générées par les simulations de différents scénarios de changement climatique jusqu'au seuil de 2069 seront utilisées. Ainsi, la variation des conditions climatiques sera directement prise en compte dans le calcul de la réponse mécanique et de la performance de la chaussée.

2.1.2 Trafic

Le trafic de véhicules lourds est une donnée essentielle pour la conception des chaussées et l'analyse structurale. La caractérisation du trafic consiste à estimer la répartition de la charge à l'essieu appliquée à la structure de la chaussée. Le MEPDG n'utilise pas les charges équivalentes à un seul essieu (ECAS) et n'exige pas le développement de facteurs d'équivalence de charge. Le MEPDG, et par conséquent le logiciel AASHTOWare PMED, utilise dans sa procédure le spectre de charge à l'essieu pour chaque classe de véhicule. Le volume du trafic, les facteurs d'ajustement du volume (par exemple, la répartition par classe et les facteurs de croissance) et les données relatives au poids sont utilisés comme paramètres d'entrée, ainsi que d'autres variables complémentaires telles que la pression de gonflage des pneus et la répartition géométrique des essieux. Les spectres de charge par essieu sont obtenus à partir du traitement des données de pesage en mouvement (WIM). Les paramètres suivants sont considérés comme spécifiques au site et doivent être obtenus par l'administration routière.

2.1.2.1 Débit journalier moyen annuel de camions (DJMAC)

Le DJMAC a un effet significatif sur la prédiction de la performance des chaussées et représente une pondération moyenne du nombre de véhicules lourds pour les jours ouvrables normaux de l'année. La valeur d'entrée dans l'AASHTOWare PMED est le DJMAC à l'ouverture de la route à la circulation.

2.1.2.2 Croissance des classes de véhicules

L'AASHTOWare PMED a la capacité de calculer des taux de croissance pour différentes classes de camions, mais il suppose que le taux de croissance est indépendant dans le temps, c'est-à-dire que le taux d'augmentation reste constant sur toute la période de l'analyse. Le taux de croissance est difficile à estimer avec précision en raison de divers facteurs socio-économiques et liés au site qui sont difficiles à prévoir sur de longues périodes.

2.1.2.3 Ajustements mensuels

Les facteurs d'ajustement pour le trafic mensuel de camions représentent la proportion du trafic annuel de camions pour la classe de véhicules telle qu'elle se présente au cours d'un mois spécifique. Le trafic de camions d'une classe est donné par le trafic de camions pour le mois divisé par le trafic total de camions de cette classe de camions pour l'année entière. Les facteurs d'ajustement mensuels du trafic de camions (MAF) dépendent de facteurs tels que l'utilisation des routes adjacentes, l'emplacement des industries dans la région, l'emplacement de la route (urbaine ou rurale) et les conditions météorologiques. Les facteurs d'ajustement mensuels peuvent être calculés à l'aide de l'équation suivante :

$$MAF_i = \frac{DJMAC_i}{\sum_{j=1}^{12} DJMAC_j} \times 12 \quad (3)$$

La somme des MAF de tous les mois doit être égale à 12.

2.1.2.4 Distribution des groupes d'essieux pour chaque classe de camions

Cette entrée représente le nombre moyen d'essieux pour chaque classe de camions (classe 4 à 13) pour chaque type d'essieu (essieu simple, tandem, tridem et quadruple).

2.1.2.5 Diagrammes des masses par essieux

Les diagrammes de masses par essieux, ou spectres de charge, indiquent la fréquence à laquelle les différentes amplitudes de charge (regroupées en plages) se produisent pour chaque type d'essieu considéré (essieu simple, tandem, tridem et quadruple) sur une période donnée. Ils sont définis comme le rapport entre le nombre d'essieux ayant une certaine plage de charge et le nombre total de ce type d'essieu, exprimé en pourcentage. Les plages de charge, qui définissent les intervalles de classe, utilisées dans l'AASHTOWare PMED correspondent aux valeurs définies par la FHWA. La Figure 1 montre la comparaison entre les diagrammes de masses définis par défaut dans le logiciel AASHTOWare PMED et les mesures effectuées par le MTMD pour un véhicule de classe 4 (Martineau, 2012).

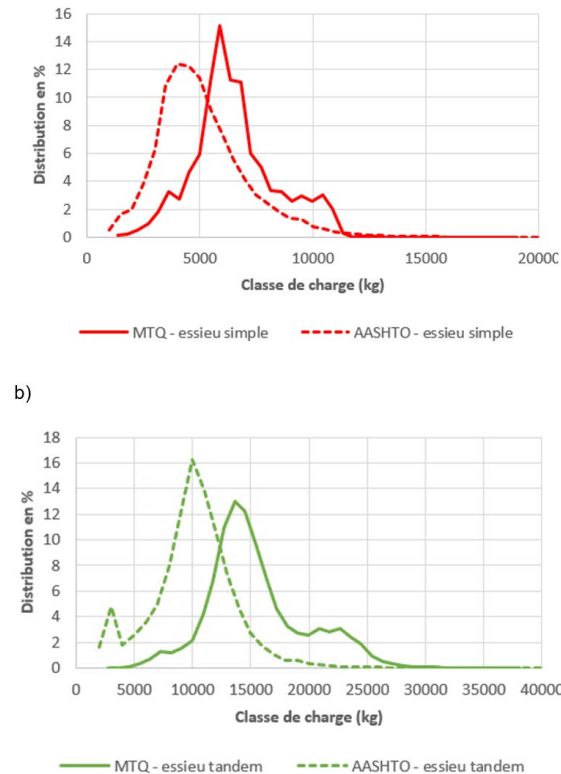


Figure 1 : Diagramme de masse des essieux pour les véhicules de la classe 4, station de référence : l'Ange-Gardien. (a) essieu simple, (b) essieu tandem

Comme il est possible de le constater, il y a une différence entre les valeurs par défaut et les mesures sur le terrain effectuées par le MTMD. La section 6.3 de ce rapport présente la méthodologie à utiliser pour généraliser les mesures du MTMD afin de représenter adéquatement le comportement du trafic dans la province de Québec.

2.1.3 Propriétés des matériaux de la chaussée

Les niveaux d'entrée de conception hiérarchiques du MEPDG offrent une certaine flexibilité pour obtenir des entrées de conception en fonction de la criticité du projet et des ressources disponibles. L'approche hiérarchique est basée sur la philosophie selon laquelle le niveau d'effort d'ingénierie dans le processus de conception et la caractérisation des matériaux et des sols doit être cohérent avec l'importance relative, la taille et le coût du projet conçu. Les variables relatives au trafic, aux matériaux et à la chaussée sont classées en trois niveaux d'entrée hiérarchiques.

- a. Niveau 1 : Le paramètre d'entrée est directement mesuré sur une base spécifique au site ou au projet. Ce niveau représente le plus haut degré de connaissance de la variable d'entrée pour un projet spécifique, mais il a le plus haut niveau de coûts de collecte d'informations et de tests pour déterminer la valeur d'entrée. Le niveau 1 est généralement recommandé pour les conceptions de chaussées à des endroits présentant des caractéristiques inhabituelles ou pour les matériaux avec conditions hors du domaine de corrélation des autres niveaux de précision.
- b. Niveau 2 : Le paramètre d'entrée est calculé à partir de corrélations ou d'équations de régression. La valeur d'entrée est déduite à partir de données ou de paramètres moins

coûteux à mesurer. Le niveau d'entrée 2 peut également représenter des valeurs régionales mesurées qui ne sont pas spécifiques au projet.

- c. Niveau 3 : Le paramètre d'entrée est basé sur des valeurs par défaut. Pour le niveau d'entrée 3 la valeur moyenne d'un groupe de données ayant des caractéristiques similaires est utilisée. Ce niveau d'entrée a le plus faible degré de connaissance du paramètre d'entrée pour le projet spécifique, mais a les plus faibles coûts de test et de collecte de données.

Le niveau 1 implique des essais approfondis en laboratoire, tandis que le niveau 3 exige du concepteur qu'il estime les valeurs les plus appropriées pour les propriétés des matériaux en se basant sur son expérience et avec peu ou pas de données d'essai. Pour le processus d'étalonnage, les niveaux hiérarchiques seront sélectionnés pour les variables d'entrée qui fournissent la meilleure représentation des conditions générales du réseau routier du MTMD et qui peuvent être facilement appliquées dans la pratique.

Le MEPDG recommande que les niveaux 2 ou 3 soient utilisés pour définir les propriétés des matériaux bitumineux lors de la phase de conception de nouvelles chaussées, à moins que l'administration ne dispose de bibliothèques d'essais en laboratoire pouvant servir de référence (ce qui est considéré comme le niveau 2). La recommandation ci-dessus est basée sur le fait que les propriétés spécifiques au projet (telles que les propriétés volumétriques) ne seront pas disponibles pendant la phase de conception, puisque les nouvelles couches de la chaussée n'ont pas encore été produites et placées sur le site.

2.1.4 Indicateurs de performance (lois d'endommagement)

La réponse mécanique de la chaussée est calculée pour chaque couche ou sous-couche de la chaussée en utilisant la théorie de l'élasticité avec le programme JULEA (Huang, 2004), qui est intégré dans le logiciel AASTHOWare PMED (AASHTO, 2020a). Le logiciel utilise l'EICM pour ajuster les valeurs du module des couches en fonction de la température et de l'humidité. Les réponses critiques de la chaussée sont utilisées pour calculer les dommages par fatigue, fissuration thermique et déformation permanente. Le MEPDG base sa prédiction de chaque indicateur de performance sur des équations développées en laboratoire et étalonnées avec les mesures de performance des sites LTPP et autres, ces équations sont incorporées dans AASTHOWare PMED comme décrit ci-dessous.

Note : Dans cette section, les équations seront présentées telles que décrites par l'AASHTO (2020a), et le système d'unités impériales sera donc utilisé.

2.1.4.1 Orniérage

L'orniérage est une dépression dans les pistes de roues, résultant de l'accumulation de déformations plastiques ou permanentes dans les différentes couches de la chaussée. L'approche utilisée dans le MEPDG est basée sur le calcul de la déformation incrémentielle ou de l'accumulation d'orniérage dans chaque sous-couche de la chaussée, en utilisant le point médian de chaque sous-couche comme point de référence. Pour les enrobés bitumineux l'équation (4) est utilisée pour prédire l'orniérage :

$$\Delta_{p(AC)} = \varepsilon_{p(AC)} \times h_{AC} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_{r(AC)} 10^{k_{1r}} n^{k_{3r}} \beta_{3r} T^{k_{2r}} \beta_{2r} \quad (4)$$

Où,

$\Delta_{p(AC)}$ = la déformation permanente accumulée dans la couche d'enrobé, en pouces.

$\varepsilon_{p(AC)}$ = la déformation axiale permanente accumulée dans la couche d'enrobé bitumineux, en pouces/pouces.

h_{AC} = l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux, en pouces.

$\varepsilon_{r(AC)}$ = la déformation élastique calculée par le modèle structural au point médian de chaque couche d'enrobé bitumineux, en pouces/pouces.

n = le nombre d'applications de la charge par essieu.

T = la température de l'enrobé bitumineux ou de la chaussée, en °F.

k_z = le facteur d'ajustement du niveau de confinement en fonction de la profondeur.

$k_{1r,2r,3r}$ = les coefficients d'ajustement global dérivés pour les enrobés bitumineux à granulométrie dense ($k_{1r}=2,454$; $k_{2r}=3,01$ et $k_{3r}=0,22$).

$\beta_{1r,2r,3r}$ = les coefficients d'étalonnage locaux ; pour l'étalonnage global, ces constantes sont $\beta_{1r}=0,40$; $\beta_{2r}=0,52$ et $\beta_{3r}=1,36$.

Pour le calcul du facteur k_z , l'équation suivante est utilisée :

$$k_z = 0,328196^D \times (C_1 + C_2 D) \quad (5)$$

Où,

$$C_1 = -0,1039 \times H_{AC}^2 + 2,4868 \times H_{AC} - 17,342 \quad (6)$$

$$C_2 = 0,0172 \times H_{AC}^2 - 1,7331 \times H_{AC} + 27,428 \quad (7)$$

Où H_{AC} est l'épaisseur totale de la couche d'asphalte, en pouces, et D est la profondeur sous la surface, en pouces.

L'équation (8) montre le modèle utilisé pour calculer la déformation verticale plastique dans les sous-couches non liées de la chaussée et dans le sol.

$$\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{soil} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{n} \right)^\beta} \quad (8)$$

Où,

$\Delta_{p(soil)}$ = la déformation permanente cumulée, pour la couche de fondation et sous-fondation en pouces.

n = le nombre d'applications de charge.

ε_0 = l'ordonnée à l'origine déterminée à partir d'essais triaxiaux cycliques en laboratoire, en pouces/pouces.

ε_r = la déformation résiliente imposée en laboratoire pour déterminer les propriétés ε_0 , β et ρ .

ε_v = la déformation verticale résiliente moyenne dans la couche/sous-couche calculée à partir du modèle structural, en pouces/pouces.

h_{soil} = l'épaisseur de la couche/sous-couche de matériau non liée, en pouces.

k_{s1} = le coefficient d'étalonnage global, qui dépend du type de matériau ou de sol ($k_{s1}=0,965$ pour les agrégats granulaires de fondation, $k_{s1}=0,965$ pour les sols à gradation grossière, $k_{s1}=0,635$ pour les sols sableux et $k_{s1}=0,675$ pour les sols à gradation fine).

β_{s1} = le coefficient d'étalonnage local. Une première valeur spécifique à la couche de fondation est notée β_{s1} , la seconde est définie pour la couche de sol support comme β_{sg1} . Les deux valent 1 pour l'étalonnage global.

Les équations (9), (10) et (11) présentent les coefficients nécessaires au calcul de l'équation (8).

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 \times \omega_c \quad (9)$$

$$\rho = 10^9 \left(\frac{C_0}{1 - (10^9)^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

$$C_0 = \ln \left(\frac{a_1 M_r^{b_1}}{a_9 M_r^{b_9}} \right) = 0,0075 \quad (11)$$

Où,

ω_c = la teneur en eau, en pourcentage.

M_r = le module réversible de la couche ou sous-couche non liée, en psi.

$a_{1,9}$ = les constantes d'ajustement ($a_1=0,15$ et $a_9=20,0$).

$b_{1,9}$ = les constantes d'ajustement ($b_1=0,0$ et $b_9=0,0$).

La profondeur d'orniérage est calculée comme la somme des contributions partielles des différentes couches de la chaussée, comme indiqué par l'équation (12).

$$RD = \sum_{i=1}^m \Delta_{p(i)} \quad (12)$$

Où,

RD = la profondeur de l'orniérage.

$\Delta_{p(i)}$ = la déformation permanente accumulée dans la couche i .

m = le nombre de couches/sous-couches dans la chaussée.

2.1.4.2 Fissuration associée à des charges lourdes

La fissuration liée à la répétition des charges lourdes est divisée en deux types :

- a. Fissures en piste de roues par le bas : fissures associées à la fatigue du revêtement en lien avec le passage répété des charges lourdes. La fissuration en piste de roue est définie par une série de fissures interconnectées qui prennent naissance à la base de la couche d'enrobé. L'unité utilisée pour les fissures simples ou multiples (carrelage) est le pourcentage de la surface totale de la bande affectée par la rupture (%).
- b. Fissure longitudinale par le haut : fissures associées à la fatigue du revêtement en lien avec le passage répété des charges lourdes et définies par des fissures parallèles à l'axe de la chaussée. Les fissures longitudinales commencent à la surface et se propagent vers le bas de la couche d'enrobé. L'unité de fissuration longitudinale est le pied par mile (pi/mi).

Deux modèles de détérioration sont utilisés pour analyser la fissuration, en différenciant les mécanismes de fissuration qui commencent par le haut de l'enrobé bitumineux et ceux qui commencent par le bas (AASHTO, 2020b). Les modèles de propagation pour les différents types de fissures associés à la charge des véhicules lourds sont présentés dans les sections suivantes.

2.1.4.2.1 Fissures en piste de roues par le bas

Le nombre admissible de répétitions de charges associées à la fissuration initiée par le bas de l'enrobé bitumineux est indiqué dans l'équation (13).

$$N_{f(AC)} = k_{f1} \times C \times C_H \times \beta_{f1} \times (\varepsilon_t)^{k_{f2} \times \beta_{f2}} \times (E_{AC})^{k_{f3} \times \beta_{f3}} \quad (13)$$

Où,

$N_{f(AC)}$ = le nombre admissible de répétitions de charge pour une chaussée souple.

ε_t = la déformation en traction aux endroits critiques calculée à partir du modèle de réponse structurale, en pouces/pouces.

E_{AC} = le module dynamique de l'enrobé bitumineux, mesuré en compression, en psi.

$k_{f1, f2, f3}$ = le coefficient d'étalonnage global ($k_{f1}=3,75$, $k_{f2}=2,87$ et $k_{f3}=1,46$).

$\beta_{f1, f2, f3}$ = les coefficients d'étalonnage locaux. Pour l'étalonnage global : β_{f1} dépend de l'épaisseur de la couche (voir Tableau 2), $\beta_{f2}=1,32$ et $\beta_{f3}=0,88$.

Tableau 2 : Équations pour le calcul de β_{f1} par rapport à H_{AC}

Épaisseur de la couche (H_{AC})	β_{f1}
$H_{AC} \leq 5 \text{ po}$	$\beta_{f1} = 0,02054$
$5 \text{ po} < H_{AC} < 12 \text{ po}$	$\beta_{f1} = 5,014 \times (H_{AC})^{-3,416}$
$H_{AC} \leq 12 \text{ po}$	$\beta_{f1} = 0,001032$

$$C = 10^M \quad (14)$$

$$M = 4,84 \times \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69 \right) \quad (15)$$

Où,

H_{AC} = l'épaisseur totale de la couche d'enrobé bitumineux, en pouces.

V_{be} = le volume de bitume effectif dans l'enrobé, en pourcentage.

V_a = les vides d'air dans l'enrobé, en pourcentage.

C_H = le terme de correction de l'épaisseur, en fonction du type de fissure. L'équation (16) est utilisée dans le cas des fissures en piste de roues par le bas (du bas vers le haut), et l'équation (17) est utilisée dans le cas de fissures en piste de roue par le haut (du haut vers le bas).

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \times H_{AC})}}} \quad (16)$$

$$C_H = \frac{1}{0,01 + \frac{1200}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 \times H_{AC})}}} \quad (17)$$

Le Tableau 3 montre l'approche proposée par le MEPDG pour le calcul du C_H uniquement en fonction de l'épaisseur totale de couche d'asphalte (H_{AC}) en pouces.

Tableau 3 : Équations pour le calcul de C_H par rapport à H_{AC}

Calcul du C_H	
$H_{AC} \leq 2,5$	$C_H = \frac{1}{0,005169 \times (H_{AC})^{2,913059}}$
$2,5 < H_{AC} < 14,5$	$C_H = \frac{1}{-0,046908 \times (H_{AC})^3 + 0,729644 \times (H_{AC})^2 - 0,635578 \times H_{AC} - 1,555892}$
$H_{AC} \geq 14,5$	$C_H = 4,255$

L'indice d'endommagement différentiel (ΔDI) est calculé en divisant le nombre attendu de répétitions de charge (trafic) par le nombre admissible de répétitions de charge défini par l'équation (13), cette approche est connue comme l'hypothèse de Minner's. L'indice d'endommagement cumulatif (DI) pour chaque emplacement critique est déterminé en additionnant les indices d'endommagement incrémentiel dans le temps, comme le montre l'équation (18) :

$$DI = \sum (\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum \left(\frac{n}{N_{f(AC)}} \right)_{j,m,l,p,T} \quad (18)$$

Où,

n = le nombre réel de répétitions de la charge dans une période de temps spécifique.

j = l'amplitude de la charge par essieu.

m = le type de charge par essieu (simple, tandem, tridem ou quadridem).

l = le type de camion, en utilisant la classification par groupe incluse dans le logiciel AASHTOWare PMED.

p = le mois.

T = la température moyenne de l'intervalle de mois, en °F.

La surface affectée par les fissures en piste de roues et la longueur des fissures longitudinales sont calculées à partir de DI . L'équation (19) est la relation utilisée pour prédire la surface affectée par les fissures en piste de roues sur une surface :

$$FC_{bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_4}{1 + e^{[C_1 \times C_1^* + C_2 \times C_2^* \times \log(100 \times DI_{bottom})]}} \right) \quad (19)$$

Où,

FC_{bottom} = la surface de fissures initiées au bas de la couche d'enrobe bitumineux, en pourcentage de la surface totale de la voie.

DI_{bottom} = l'indice d'endommagement cumulatif au bas de la couche d'enrobée.

$C_{1,2,4}$ = les constantes de régression ($C_4=6000$, $C_1=1$ et $C_2=1$). Les variables C_1 et C_2 sont des coefficients d'étalonnage locaux.

$$C_1^* = -2 \times C_2^* \quad (20)$$

$$C_2^* = -2,40874 - 39,748 \times (1 + H_{AC})^{-2,856} \quad (21)$$

2.1.4.2.2 Fissure en piste de roues par le haut

Le modèle mécanique de rupture incorporé dans le logiciel AASHTO PMED utilise la loi de Paris sur la propagation des fissures pour caractériser la croissance des fissures due à l'application répétée de charges de trafic.

$$\frac{dc}{dN} = A \times (\Delta K)^n \quad (22)$$

$$\frac{dc}{dT} = A \times (\Delta K)^n \quad (23)$$

Où,

C = la longueur de la fissure et dc est la croissance de la longueur de la fissure.

N = le nombre de cycles de charge et dN est l'augmentation des cycles de charge sur un incrément de temps.

T = la température et dT est l'incrément des cycles thermiques pendant un incrément de temps.

ΔK = l'amplitude de l'intensité de la contrainte qui dépend du niveau de contrainte, de la géométrie de la structure de la chaussée, du modèle de fracture, de la longueur de la fissure et de l'efficacité du transfert de charge à travers la fissure ou le joint.

A , n = les propriétés de rupture de l'enrobé bitumineux.

L'étude NCHRP 1-52 a montré que la contrainte thermique transversale ne contribue pas de manière significative à la croissance des fissures par le haut (Lytton et al., 2018). Par conséquent, l'intensité de la contrainte à l'extrémité de la fissure due à la charge du trafic est utilisée pour calculer l'augmentation de la longueur de la fissure. La formation de microfissures et la rupture subséquente de l'enrobé bitumineux sont modélisées à l'aide de la loi de Paris modifiée présentée ci-dessous.

$$\frac{dc}{dN} = A' \times (J_R)^{n'} \quad (24)$$

Où,

C = la longueur de la fissure et dc est la variation ou la croissance de la longueur de la fissure.

N = le nombre de cycles de charge et dN est l'incrément de cycles de charge sur un incrément de temps.

A' , n' = les propriétés de rupture de l'enrobé bitumineux.

J_R = le pseudo-intégral J .

Le pseudo-intégral J utilisé dans la loi de Paris modifiée est défini comme le pseudo-incrément de travail dissipé par unité de surface de fissure. L'intégrale J est liée aux facteurs d'intensité des contraintes (K , tels que définis dans l'équation (22)) comme le montre l'équation (25).

$$J_R = \frac{1 - \nu^2}{E_R} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1 - \nu^2}{E_R} K_{III}^2 \quad (25)$$

Où,

ν = le coefficient de Poisson de l'enrobé bitumineux.

E_R = le module d'élasticité représentatif.

K_I = le facteur d'intensité des contraintes du mode I (ouverture).

K_{II} = le facteur d'intensité des contraintes du mode II (cisaillement dans le plan).

K_{iii} = le facteur d'intensité des contraintes pour le mode III (action hors du plan).

L'intégrale J est calculée à partir des facteurs d'intensité de la contrainte dans les trois modes de rupture, présentés ci-dessous dans la Figure 2.

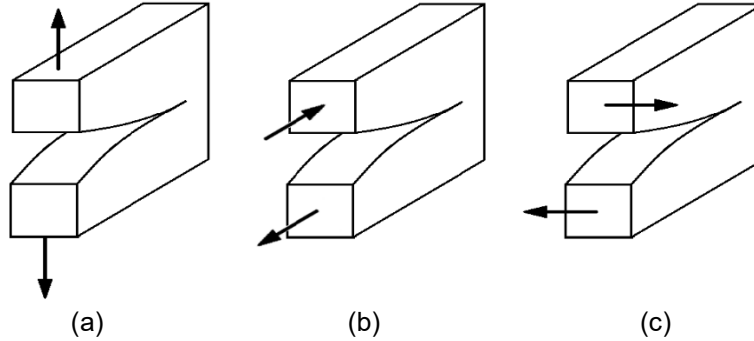


Figure 2 : Trois modes de sollicitation d'une fissure. (a) mode I, ouverture, (b) mode II, cisaillement dans le plan et, (c) mode III, action hors du plan. (AASHTO, 2020b)

Le paramètre de fracture est calculé à partir de la volumétrie de l'enrobé et des paramètres associés à la loi de puissance du module de relaxation de l'enrobé (E_1 et m), comme indiqué dans l'équation (26). Le paramètre A' est fortement corrélé avec n' et est calculé directement à l'aide d'une équation de régression.

$$n' = -9,0049 + 1,0627\psi + \frac{2,8713}{m} - 40,8788 \left(\frac{1}{E_1}\right)^m + 18,868 \left(\frac{P_b}{V_a + P_b}\right) \quad (26)$$

$$A' = 10^{-1,2752n' - 1,713} \quad (27)$$

Où,

V_a = la teneur en vides dans l'enrobé bitumineux, %.

P_b = le pourcentage de liant bitumineux par rapport au poids du l'enrobé, %.

ψ = le paramètre de forme de la fonction de loi de puissance agrégée.

E_1, m = le module de relaxation. Paramètres de la fonction de loi de puissance, asphalte vieilli.

La croissance des fissures est modélisée en utilisant la loi de Paris modifiée sur la durée de vie de la chaussée. Le temps d'initiation de la fissure, défini comme le temps nécessaire pour atteindre une longueur de fissure de 7,5 mm, est calculé à l'aide d'une équation de régression (28). Les données sur la fissuration longitudinale et le carrelage de la base de données LTPP ont été utilisées pour calibrer les fonctions de transfert de t_0 et de la surface de la fissure (AASHTO, 2020b).

$$t_0 = \frac{K_{L1}}{1 + e^{K_{L2} \times 100 \times (a_0/2A_0) + K_{L3} \times HT \times K_{L4} \times LT + K_{L5} \times \log_{10} AADTT}} \quad (28)$$

Où,

t_0 = le temps jusqu'à l'initiation de la fissure, jours.

HT = le nombre annuel de jours au-dessus de 32 °C.

LT = le nombre annuel de jours en-dessous de 0 °C.

$AADTT$ = le trafic journalier moyen annuel de camions (année initiale).

$a_0/2A_0$ = le paramètre énergétique, calculé par l'équation (29).

K_{Li} = les coefficients d'étalonnage pour le temps de début de fissure ($K_{L1} = 64271618$; $K_{L2} = 0,2855$; $K_{L3} = 0,011$; $K_{L4} = 0,01488$; $K_{L5} = 3,266$).

$$\frac{a_0}{2A_0} = 0,1796 + 1,5 \times 10^{-5} E_1 - 0,69m - 7,169 \times 10^{-4} H_{AC} \quad (29)$$

Où H_{AC} est l'épaisseur totale de l'enrobé.

Le pourcentage total de la surface avec fissures par le haut est calculé en fonction du nombre de mois avant la rupture et de la surface maximale des fissures admissibles, L_{max} . Une valeur de 58 % est supposée pour L_{max} et représente la surface totale de deux pistes de roues. La prédiction de la fissure par le haut en fonction du temps est une courbe en forme de S et est calculée à l'aide du modèle présenté dans l'équation (30).

$$L(t) = L_{max} e^{-\left(\frac{c_1 \rho}{t - c_3 t_0}\right)^{c_2 \beta}} \quad (30)$$

Où,

$L(t)$ = la surface totale de la voie avec fissuration par le haut, %.

L_{max} = la surface maximale de fissuration par le haut, %.

ρ = le paramètre d'échelle de la courbe de fissuration par le haut.

β = le paramètre de forme de la courbe de fissuration par le haut.

t_0 = le temps jusqu'à l'initiation de la fissure, en jours.

t = le mois de l'analyse, en jours.

c_1 , c_2 et c_3 = les coefficients de calibration.

Les paramètres d'échelle et de forme ρ et β sont calculés en fonction du nombre de mois avant rupture, par les équations (31) et (32), respectivement.

$$\rho = \alpha_1 + \alpha_2 \times \text{mois} \quad (31)$$

$$\beta = 0,7319 \times (\log_{10}(\text{mois}))^{-1,2801} \quad (32)$$

Où α_1 et α_2 sont des paramètres dont les valeurs dépendent de la zone climatique (humide ou sèche), comme présenté dans le Tableau 4. L'étalonnage du modèle de fissuration vers le bas est appliqué à la fois au modèle de prédiction des fissures (Équation (30)) et au nombre de jours avant l'initiation des fissures (Équation (28)).

Tableau 4 : Paramètres d'étalonnage α_1 et α_2 - Coefficients globaux (AASHTO, 2020b)

Zone climatique	α_1	α_2
Gel humide	631,04	2269,8
Non-gel humide	631,04	2269,8
Gel sec	1617,6	-1705,3
Non gel sec	1617,6	-1705,3

2.1.4.2.3 Identification du type de fissure pour l'étalonnage

Comme décrit précédemment, différents mécanismes d'endommagement définissent les fissures (par le bas or par le haut). Cependant, la définition d'une méthode d'identification efficace de ces deux types de fissures sur le terrain est encore un processus en évolution. En pratique, il est décidé d'utiliser les données de fissuration des sections avec une forte probabilité d'être de la fissuration par le bas pour l'étalonnage du modèle de performance associé à ce type de fissuration, et toutes les données des sections avec une forte probabilité d'occurrence de la fissuration par le haut pour l'étalonnage du modèle de fissuration par le haut. Aucune discrétisation individuelle des fissures n'est effectuée, mais toutes les fissures d'une section de référence sont considérées comme étant d'un type spécifique (le plus probable).

Pour définir la probabilité du type de fissure dans la section de la chaussée, on utilisera le paramètre d'endommagement présenté dans l'équation (33), utilisé pour caractériser les couches d'enrobé bitumineux à des fins de réhabilitation (FHWA, 2018).

$$DI_E = 1 - \frac{E_{FWD}}{E_{pre}^*} \quad (33)$$

Où,

DI_E est le paramètre d'endommagement.

E_{FWD} et E_{pre}^* représentent respectivement le module de la couche d'enrobé bitumineux estimé sur le terrain à partir des bassins de déflexion mesurés par le deflectomètre à masse tombante (FWD) et le module dérivé en laboratoire de la couche d'enrobé bitumineux. Pour une chaussée non endommagée, E_{FWD} est théoriquement égal à E_{pre}^* ; par conséquent, la valeur du DI_E est 0. Dans la pratique, cependant, il est possible d'obtenir des valeurs DI_E négatives si E_{FWD} est supérieur à E_{pre}^* , car l'enrobé bitumineux vieillit ou devient plus rigide.

Le DI_E peut être utilisé pour évaluer les taux d'endommagement entre différents mécanismes de fissuration. Les combinaisons sont définies comme suit (FHWA, 2018) :

- Neutre ou non classée : Combinaison de valeurs de fissuration par fatigue et de DI_E où il était difficile de déterminer (sans l'utilisation de carottes) si les fissures se propageaient de bas en haut ou de haut en bas.
- De haut en bas : Combinaison de valeurs de fissuration par fatigue et de DI_E avec une probabilité plus élevée de fissuration par le haut, de carrelage près de la surface ou d'un autre défaut près de la surface.
- De bas en haut : Combinaison de valeurs de fissuration par fatigue et de DI_E avec une probabilité plus élevée de fissuration par le bas (toutes les fissures peuvent ne pas avoir atteint la surface), de dommages dus à l'humidité, de carrelage ou d'autres défauts dans la partie inférieure de la couche d'enrobé bitumineux.

Le Tableau 5 montre le type de fissure le plus probable en utilisant les valeurs du DI_E et le pourcentage de la surface affectée par la fatigue.

Tableau 5 : Types de fissures de fatigue les plus probables selon le paramètre DI_E

DI_E	Fissuration (surface en %)						
	0	0 - 2	2 - 10	10 - 20	20 - 35	35 - 50	> 50
Négative	NN ^a	Par le haut	Par le haut	Par le haut	Par le haut	Par le haut	Par le haut
0 – 0,25	Par le bas	NN ^a	NN ^a	Par le haut	Par le haut	Par le haut	Par le haut
0,25 – 0,50	Par le bas	Par le bas	Par le bas	NN ^a	NN ^a	Par le haut	Par le haut
0,50 – 0,75	Par le bas	Par le bas	Par le bas	Par le bas	Par le bas	NN ^a	Par le haut
> 0,75	Par le bas	Par le bas	Par le bas	Par le bas	Par le bas	Par le bas	NN ^a

^aNN : Neutre ou non classée.

2.1.4.3 Fissures sous contrainte thermique (fissures transversales)

Les fissures transversales sont associées aux sollicitations thermiques et non liées à la charge. Elles sont principalement perpendiculaires à la ligne centrale de la chaussée et sont causées par la contraction thermique associée aux températures froides ou cycles thermiques. Le modèle de prédiction de la fissuration transversale est basé sur la mécanique de rupture, comme le montre l'équation (34):

$$\Delta C = A(\Delta K)^n \quad (34)$$

Où,

ΔC = la variation de la profondeur des fissures due aux cycles de refroidissement.

ΔK = la variation du facteur d'intensité de la contrainte due aux cycles de refroidissement.

A , n = les paramètres de rupture de l'enrobés bitumineux.

Les paramètres de rupture de l'enrobé bitumineux peuvent être estimés à partir des essais de traction indirecte selon les équations (35) et (36) :

$$A = k_t \beta_t 10^{(4.389 - 2.52 \log(E_{AC} \sigma_m^n))} \quad (35)$$

$$n = 0.8 \times \left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (36)$$

Où,

k_t = le coefficient d'étalonnage global, dépendant de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT), tel que défini dans le Tableau 6.

β_t = le coefficient de calibration local ($\beta_t=1$ pour les contraintes de calibration global).

E_{AC} = le module de traction indirecte de l'enrobés bitumineux, psi.

σ_m = la résistance à la traction de l'enrobé bitumineux, psi.

m = la valeur m dérivée de la courbe de contrainte indirecte de fluage-compliance mesurée en laboratoire.

Tableau 6 : Équations pour le calcul de k_t par rapport à MAAT

<i>MAAT</i>	Calcul de k_t
$> 57\text{ °F (13,8 °C)}$	$k_t = 0,13 \times (MAAT)^2 - 11,68 \times (MAAT) + 244,14$
$\leq 57\text{ °F (13,8 °C)}$	$k_t = 3 \times 10^{-7} (MAAT)^{4,0319}$

Le facteur d'intensité de la contrainte, K , est incorporé dans le logiciel AASHTOWare PMED par l'équation (37), qui a été développée à partir d'études théoriques par éléments finis :

$$K = \sigma_{tip} \times (0,45 + 1,99(C_0)^{0,56}) \quad (37)$$

Où,

σ_{tip} = la contrainte appliquée aux frontières éloignées calculée avec le modèle de réponse de la chaussée.

C_0 = la longueur réelle de la fissure, en pieds.

La fissuration thermique est estimée à l'aide de l'équation (38) :

$$TC = \beta_{t1} N \left(\frac{1}{\sigma_d \log \left(\frac{C_d}{H_{AC}} \right)} \right) \quad (38)$$

Où,

TC = la fissuration thermique, en pieds/mile.

β_{t1} = le coefficient d'étalonnage global ($\beta_{t1} = 400$).

$N[z]$ = la distribution normale standard évaluée à $[z]$.

σ_d = l'écart-type du logarithme de la profondeur de la fissure ($\sigma_d = 0,769$), en pouces.

C_d = la profondeur de la fissure, en pouces.

H_{AC} = l'épaisseur de la couche d'enrobé, en pouces.

2.1.4.4 Uni de surface

L'indice de rugosité international (IRI) est un indice qui représente le profil de la chaussée sur la trajectoire de la roue dans la direction de roulement. Il s'agit d'un indicateur de la qualité de l'uni et du confort au roulement de la chaussée, qui dépend globalement de la fissuration et de l'orniérage, ainsi que des facteurs météorologiques et des couches de fondations et le sol.

Le logiciel AASTHOWare PMED intègre la prédiction de la dégradation de l'uni de la chaussée en utilisant la valeur IRI comme référence. L'équation de prédiction de l'IRI des chaussées souples est présentée à l'équation (39) :

$$IRI = IRI_0 + C_1(RD) + C_2(FC_{Total}) + C_3(TC) + C_4(SF) \quad (39)$$

Où,

IRI_0 = l'IRI initial, après construction, en pouces/mile.

$C_{1,2,3,4}$ = les facteurs d'étalonnage ($C_1 = 40$; $C_2 = 0,40$; $C_3 = 0,008$; $C_4 = 0,015$).

RD = la profondeur de l'orniérage, en pouces.

FC_{Total} = la surface affectée par la fissuration associée à des charges lourdes, en pourcentage.
La longueur de la fissure est multipliée par un pied (0,3 m) pour convertir la longueur en surface.
 TC = la longueur des fissures transversales, en pieds/mile.
 SF = le facteur de site, qui est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$SF = Age^{1.5} [\ln((prec + 1)(FI + 1)p_{02}) + \ln((prec + 1)(FI + 1)p_{200})] \quad (40)$$

Où,

Age = l'âge de la chaussée, en années.

$prec$ = les précipitations annuelles moyennes, en pouces.

FI = l'indice de gel annuel moyen, en jours °F.

p_{02} = le pourcentage de matériau passant au tamis de #10.

p_{200} = le pourcentage de matériau passant au tamis de 0,075 mm.

Le MEPDG présente de nombreuses autres équations pour prédire les indicateurs de performance des chaussées souples, mais celles-ci sortent du cadre de cette étude.

2.2 Outil d'analyse d'étalonnage (CAT)

L'utilisation des principes M-E dans les modèles structuraux et climatiques (température et humidité) nécessite des paramètres d'entrée pour la conception, notamment la répartition des charges, une meilleure caractérisation des matériaux, les données climatiques, etc. Par conséquent, un effort important sera nécessaire pour évaluer et adopter la procédure de dimensionnement afin que la nouvelle méthode de conception soit capable de produire une optimisation fiable et économique. Sans étalonnage, le calcul des dommages basé sur l'approche M-E ne peut être utilisé qu'avec une fiabilité limitée.

L'AASHTO a récemment mis à disposition des utilisateurs l'outil d'étalonnage « Calibration Assistance Tool » (CAT) pour le logiciel AASTHOWare PMED avec lequel les principes statistiques nécessaires peuvent être appliqués en suivant les principes fondamentaux donnés dans le guide de calibration locale du MEPDG (AASHTO, 2010). L'outil CAT s'appuie sur deux types de fichiers : les premiers sont générés dans le logiciel AASHTOWare PMED et sont d'extension *.dgp, les seconds, de format *.csv, reflètent les mesures de terrain associées à ces fichiers. Une fois considérées, l'outil CAT permet de structurer une base de données de calibration, ainsi qu'à étudier les modèles de performance en fatigue, de l'orniérage et de l'IRI. L'outil CAT permet d'atteindre les objectifs suivants pour chaque modèle de performance (AASHTO, 2019):

- a. Concevoir et développer une matrice expérimentale.
- b. Remplir la matrice expérimentale avec des sections de chaussée.
- c. Examinez les données de performance observée et déterminez si un nombre adéquat de sections est disponible.
- d. Effectuer la vérification initiale et examiner les résultats.
- e. Déterminer s'il y a un biais dans les prédictions.
- f. Déterminer la cause d'un biais s'il est découvert lors du processus d'étalonnage.
- g. Optimiser les coefficients d'étalonnage de la ou des fonctions de transfert pour éliminer le biais et minimiser l'erreur type.
- h. Exporter les coefficients d'étalonnage finaux dans le logiciel AASHTOWare PMED.

Pour utiliser correctement l'outil d'étalonnage CAT, il faut s'assurer que les projets qui font partie de la base de données d'étalonnage sont représentatifs des pratiques de conception, et que l'exactitude et la cohérence des données de performance de la chaussée observées/mesurées doivent être vérifiées et qu'elles sont dans les bonnes unités. La Figure 3 montre un diagramme du processus d'étalonnage suivi par l'outil CAT (AASHTO, 2019).

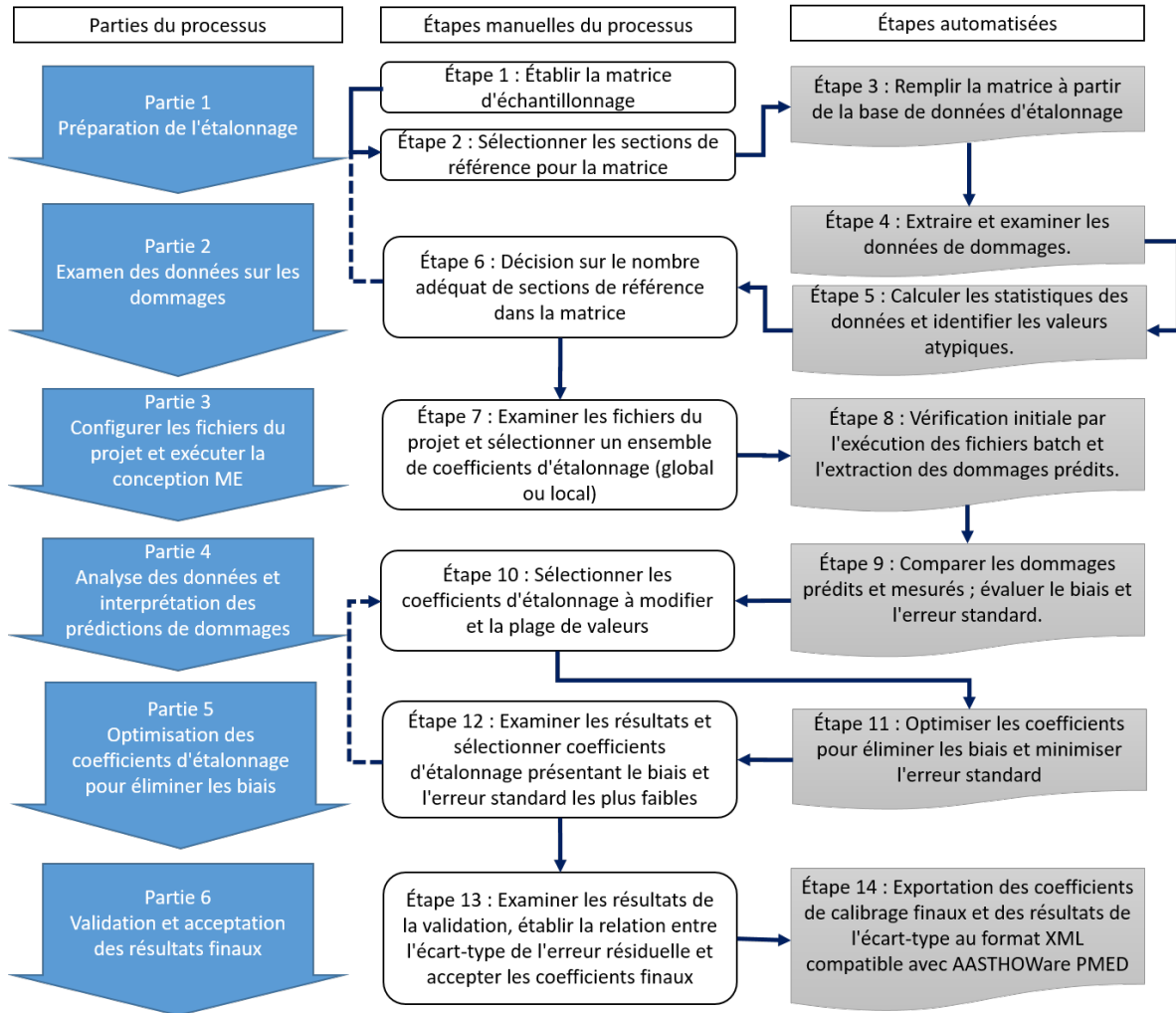


Figure 3 : Diagramme détaillé du processus d'étalonnage du CAT (AASHTO, 2019)

Comme présenté dans la Figure 3, l'outil CAT divise le processus d'étalonnage en 6 parties, et des processus manuels doivent être réalisés.

L'outil CAT permet de structurer une matrice d'étalonnage ou d'échantillonnage pour chaque modèle de performance, qui est conçue pour répondre à trois objectifs :

- Déterminer s'il existe un biais local dans le modèle de prédiction des performances du MEPDG.
- Établir la cause de tous biais, le cas échéant, au cours du processus de vérification.
- Déterminer les coefficients d'étalonnage du modèle de performance pour chacun des dommages et l'IRI.

Pour atteindre les trois objectifs ci-dessus, le CAT fait trois hypothèses: (1) la matrice d'échantillonnage résultante pour l'étalonnage d'un modèle spécifique sera équilibrée, (2) l'utilisateur a sélectionné un nombre approprié de sites de référence, et (3) chaque site a des données historiques de dommages similaires en termes de nombre de données.

L'objectif du processus d'étalonnage est de confirmer l'exactitude des modèles de prédiction d'endommagement. Des ajustements aux modèles de performance peuvent être nécessaires pour une zone géographique spécifique afin d'obtenir des conceptions de chaussées fiables. Le processus d'étalonnage local du MEPDG comprend les étapes suivantes (AASHTO, 2010):

- a. Sélectionner le niveau hiérarchique pour chacun des paramètres d'entrée.
- b. Concevoir un plan d'échantillonnage expérimental ou local.
- c. Estimer la taille de l'échantillon pour chacun des indicateurs de performance spécifiques.
- d. Sélectionner les sections de chaussée à utiliser comme référence.
- e. Extraire et évaluer les données sur la performance des chaussées.
- f. Effectuer des vérifications sur le terrain (si nécessaire).
- g. Valider les valeurs d'étalonnage global aux conditions locales.
- h. Éliminer les déviations locales dans la prédiction des performances et l'IRI.
- i. Évaluer l'erreur-type des estimations.
- j. Réduire l'erreur standard des estimations.
- k. Interpréter les résultats et décider de l'adéquation des paramètres d'étalonnage.

L'outil CAT sera utilisé pour la caractérisation statistique et pour réduire les écarts entre les prédictions du modèle et les observations réelles (étapes «b» à «j»), suivant le schéma présenté dans la Figure 3.

2.2.1.1 Données d'entrée de l'outil CAT

2.2.1.1.1 Fichier *.csv (comma delimited) pour les données mesurées

Note : À ce niveau, tout calcul sera mené avec le système international d'unités (SI).

Un certain nombre d'informations essentielles relatives aux données mesurées (sur le terrain) pour chaque projet d'étalonnage local doivent figurer sous l'outil CAT (AASHTO, 2019). Elles définissent:

- a. Nom du projet de calibration local (*.dgp), qui doit avoir le même nom que le fichier *.dgp chargé dans l'outil CAT.
- b. Âge de la chaussée en mois, calculé à partir de l'année initiale de construction et des dates des données de performance mesurées.
- c. Fissures longitudinales dans les pistes de roues initiées par le bas. Données mesurées sur la fissuration par fatigue ascendante initiée en profondeur en utilisant comme unités le pourcentage de la surface totale de la bande de roulement affectée par la fissuration.
- d. Fissures longitudinales dans les pistes de roues initiées par le haut. Données de fatigue descendante mesurées en utilisant "m/km" pour les unités.
- e. Orniérage. Données d'orniérage total mesuré sur la surface de la chaussée en utilisant "mm" pour les unités.

- f. Fissuration transversale. Données de fissuration transversale mesurées en utilisant "m/km" pour les unités.
- g. IRI. Données IRI mesurées en utilisant "m/km" pour les unités.

*2.2.1.1.2 Fichier *.dgp pour le projet d'étalonnage local*

Les fichiers *.dgp à utiliser dans l'outil CAT sont des fichiers créés dans AASTHOWare PMED, qui décrivent précisément la structure de chaussée, les matériaux, le trafic et les caractéristiques climatiques pour chaque section d'étalonnage. Le nom du projet doit correspondre au nom du projet utilisé dans le fichier *.csv avec les mesures sur le terrain.

2.3 Influence des changements climatiques sur les chaussées

Plusieurs impacts liés au changement climatique sur les chaussées ont été identifiés au Canada, y compris, mais sans s'y limiter : (1) l'orniérage et le ressuage de l'enrobé bitumineux en raison des températures élevées ; (2) la déformation excessive causée par les cycles de gel et de dégel ; et (3) les déformations et le tassement du sol par les précipitations extrêmes et les inondations (Maadani et al., 2021). Compte tenu de ce qui précède, les exigences et les processus de conception des infrastructures de transport doivent être modifiés pour tenir compte des impacts des changements climatiques, de la sélection des matériaux à la formulation des enrobés bitumineux en passant par l'amélioration de la capacité de drainage et bien plus (Warren & Lemmen, 2014).

Les conditions environnementales sont parmi les principaux paramètres à prendre en compte lors de la conception des chaussées. Une analyse de sensibilité basée sur l'augmentation des valeurs des variables climatiques (température, précipitations, vitesse du vent, rayonnement solaire et nappe phréatique) de 5 % à l'aide de MEPDG 1.1 (Qiao, 2015) a montré que la température est la variable la plus influente sur tous les types de dégradation des chaussées. En utilisant les données de température projetées pour l'année 2050 pour Seattle, Minneapolis, et Richmond (États-Unis), il a été conclu qu'une augmentation de la température pourrait entraîner de graves détériorations de l'orniérage, de la fissuration longitudinale (par fatigue bottom-up dans les pistes de roues? Ou tous types de fiss. long.?) et de la fissuration transversale.

Les performances des chaussées et de leurs matériaux, tels que l'enrobé bitumineux et le sol peuvent être directement affectés par les changements climatiques. En particulier, l'augmentation prévue de la température et les événements de chaleur extrême devraient induire de graves problèmes de performance, y compris, mais sans s'y limiter, au niveau de la déformation permanente sur les routes urbaines et rurales. Selon la littérature (Boone, 2013; Maadani et al., 2021; Saha et al., 2014), des conceptions moins précises sont obtenues si la méthode AASHTO-1993 est utilisée dans des régions climatiques autres que l'essai routier AASHTO de l'American Association of Highway Officials. Ce qui précède indique que l'adoption de méthodes ayant la capacité de mieux prendre en compte les variables climatiques locales et la caractérisation avancée des matériaux devrait être adoptée pour étudier l'influence du changement climatique sur la performance des chaussées pendant la phase de conception ou d'analyse.

Christensen et al. (2007) ont indiqué que les précipitations annuelles dans le sud du Canada augmenteraient de 5 à 30 % sur un horizon de 70 ans. Des précipitations et des tempêtes plus intenses affecteront le réseau routier, influenceront leur conception et augmenteront la fréquence

de leur entretien. Pendant les mois d'hiver, les régions où les conditions météorologiques sont sévères (fortes précipitations hivernales) sont sujettes à des fermetures permanentes de routes en raison des dommages causés par les glissements de terrain provoqués par ces conditions météorologiques sévères. Des précipitations excessives et un ruissellement accru pendant les mois d'hiver sont susceptibles d'amplifier le potentiel d'inondation des routes côtières. Ces irrégularités diminuent l'intégrité structurale des routes, de sorte que certaines améliorations structurales sont nécessaires dans les régions qui connaissent ce type d'intempéries. Les chaussées situées dans les régions froides du monde sont soumises à des conditions climatiques et environnementales difficiles, caractérisées notamment par l'humidité et le froid. La principale cause de problèmes des chaussées souples est leur sensibilité à l'eau. La pénétration de l'eau dans les différentes couches de la route influence les propriétés physiques des matériaux, ce qui affaiblit certaines parties de la surface et crée des points de contrainte élevés dans la structure de chaussée. L'effet de ces conditions est une détérioration importante des routes et des coûts élevés pour réparer ces zones endommagées (Maadani et al., 2021).

Le climat du Québec est marqué par des contrastes importants entre les saisons, typiques d'un climat continental avec un écart de température moyenne de près de 30°C entre l'hiver et l'été pour une région donnée. De plus, le climat du Québec comprend à la fois des zones tempérées et des zones typiquement subpolaires et polaires. Thiam (2014) a décrit les caractéristiques suivantes comme étant le résultat des effets des changements climatiques au Québec :

- a. Une augmentation importante des températures minimales, conséquence d'un réchauffement plus important en hiver qu'en été.
- b. Dans le sud du Québec, une augmentation du nombre de journées et de nuits chaudes et une diminution du nombre de journées et de nuits froides.
- c. Un réchauffement plus rapide dans la région du nord, qui est soudainement passée d'une période de léger refroidissement à une période nettement plus chaude depuis le milieu des années 1990.
- d. Une augmentation des précipitations totales et du nombre de jours avec des précipitations de faible intensité.
- e. Une diminution de l'équivalent en eau de la neige dans le sud du Québec, alors qu'une augmentation est attendue dans le nord.

Ces observations ont été confirmées par les travaux de Lepage et al. (2012), qui affirment également que le sud du Québec a connu une augmentation de température entre 0,2 °C et 0,4 °C par décennie au cours des 30 à 40 dernières années (de 1960 à 2005). En ce qui concerne les précipitations, le nombre de jours avec des pluies de faible intensité a augmenté (Vincent & Mekis, 2006). Les quantités de neige ont augmenté dans le nord du Québec et diminué dans le sud (Brown, 2010).

En résumé, il est possible de trouver dans la littérature une documentation claire sur les changements climatiques futurs d'un point de vue global. Ces changements climatiques, à un horizon proche, concernent deux facteurs environnementaux, soit les températures et les précipitations. Ainsi, plusieurs auteurs arrivent à un consensus sur un réchauffement climatique dans la région de l'Est du Canada, plus précisément au Québec, caractérisé par une augmentation accentuée des précipitations et des températures.

2.3.1 Les zones climatiques de la province de Québec

Le Québec couvre un vaste territoire et comprend une grande diversité d'environnements. Pour permettre une prise en compte plus précise des conditions climatiques régionales, une pratique courante consiste à diviser la province en zones ayant des caractéristiques environnementales similaires. Le MTMD dispose à cet effet de différents documents de référence en matière de zonage climatique.

La carte de la Figure 4 montre la division nord-sud utilisée dans la province pour la conception des chaussées. La Figure 5 présente la carte des « Zones de dégel » du MTMD, qui est utilisée pour gérer la réduction des charges transportées par les camions lourds pendant la période de dégel printanier. Ce document divise le Québec en trois zones selon la période à laquelle survient le dégel (MTMD, 2013). De même, la Figure 6 présente la carte des zones utilisées par le MTMD pour choisir le type de bitume à utiliser pour les chaussées souples (MTMD, 2018). Dans cette carte, chaque zone est associée à un type de bitume pour la couche de surface et couche de base en enrobé bitumineux, en tenant compte d'autres critères tels que la classe fonctionnelle de la route et le DJMA. Ces figures fournissent des informations sur la prise en compte du zonage climatique dans la conception des chaussées, et seront utilisées comme référence au cours de ce projet.



Figure 4 : Délimitation des zones nord et sud de la province de Québec (MTMD, 2015)

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1



Figure 5 : Carte des zones de dégel (MTMD, 2013)

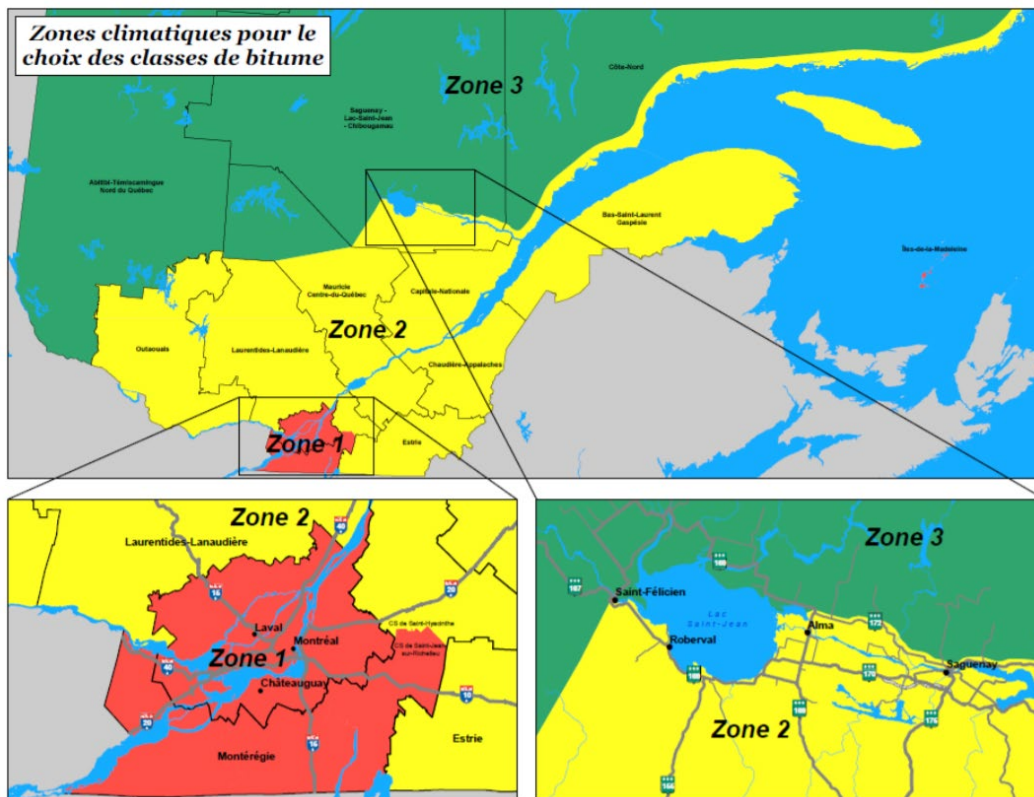


Figure 6 : Zones climatiques pour le choix des classes de bitume pour chaussée souple (MTMD, 2018)

D'autres zonages climatiques ont été proposés pour le Québec, en fonction des projections climatiques. Perron-Drolet (2015) et Bilodeau et al. (2015) présentent des zonages de la province de Québec caractérisés par une évolution climatique homogène attendue. Les deux divisions sont basées sur trois documents. Le premier document est la carte de restriction de la charge printanière (Figure 5). Le deuxième document est la carte historique de l'indice de gel de l'air sur

le territoire du Québec, utilisée pour la conception des chaussées souples au MTMD (Ladanyi, 1996). Le troisième document est l'étude de Chaumont et Brown (2010), qui présente une carte des variations de l'indice de gel de l'air pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000. La combinaison des trois documents a permis l'obtention de divisions en zones climatiques proposées par les auteurs. Dans la carte proposée Perron-Drolet (2015) (Figure 7), cinq zones sont considérées. La proposition de Perron-Drolet conserve les mêmes limites pour les zones 1 et 3 que la carte des zones de dégel du MTMD. Cependant, la zone 2 a été divisée en trois parties, les zones 2a, 2b et 2c. De cette façon, la différence d'évolution de l'indice de gel sur la côte nord et la péninsule gaspésienne est considérée.

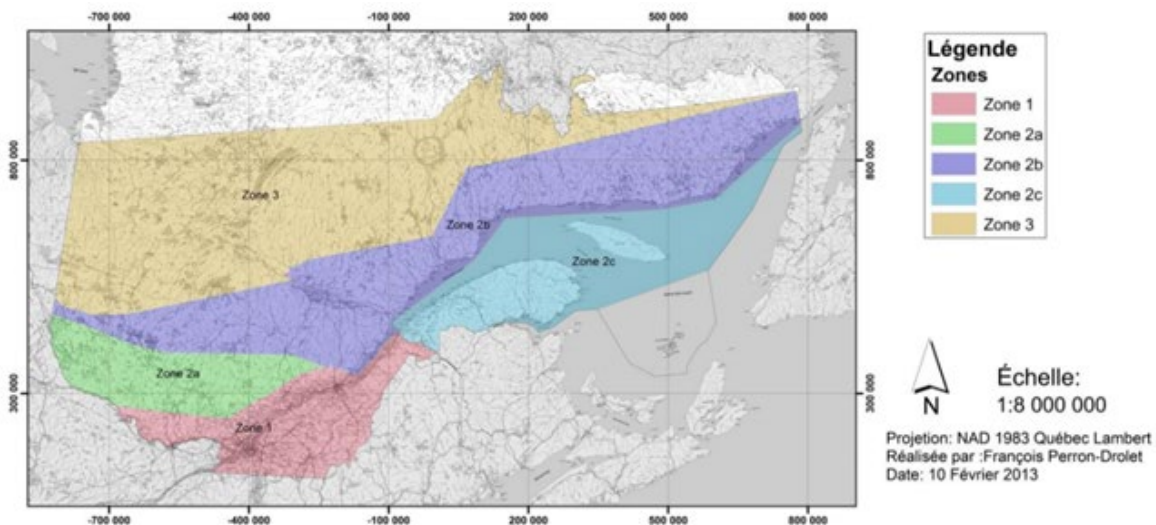


Figure 7 : Zonage climatique proposé par Perron-Drolet (2015)

2.3.2 Scénarios de changement climatique

Le changement climatique est un phénomène qui se déroule dans le temps, de sorte que sa prévision dans le futur est liée à la prise en compte de scénarios probables. Les conditions de ces scénarios sont normalement liées aux émissions futures estimées de gaz à effet de serre.

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux d'origine naturelle ou anthropique qui, par leur nature, interagissent avec le rayonnement infrarouge de la Terre. Ces gaz s'accumulent dans l'atmosphère et contribuent à conserver la chaleur de la planète en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la planète et en le réémettant dans toutes les directions, contribuant ainsi à l'effet de serre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre semble être à l'origine du récent réchauffement climatique (Ouranos, 2010).

Les scénarios climatiques permettent de prévoir les changements climatiques aux niveaux mondial et régional. Lors de l'élaboration d'un scénario climatique, il est possible de sélectionner une série de variables en fonction des indices climatiques nécessaires, tels que l'intensité des précipitations ou la température du territoire et de la période étudiée. Il est ainsi possible de simuler l'évolution probable du climat dans un contexte d'augmentation des émissions de GES. Deux types de modèles sont utilisés pour prévoir les changements climatiques : les modèles régionaux et les modèles climatiques globaux.

Les modèles climatiques globaux (MCG) sont des modèles capables de simuler les multiples interactions entre l'océan, l'atmosphère, la terre et les processus physiques et chimiques impliqués dans la « mécanique » du climat de la Terre. Ces modèles sont utilisés pour une analyse globale du changement climatique. Les modèles climatiques régionaux (MCR), contrairement aux modèles globaux, utilisent un découpage plus fin du territoire. Par exemple, le Modèle régional canadien du climat (MRCC) considère des mailles de 45 km x 45 km (Plummer et al., 2006), mais se limite à appliquer cette grille et donc à simuler une région donnée avec les conditions aux limites fournies par un modèle global.

Chacune de ces deux catégories de modèles présente des limites d'utilisation particulières ainsi que des avantages et des inconvénients qu'il est important de prendre en compte dès le départ. En règle générale, les données des MCG sont plus accessibles et couvrent une gamme plus complète de scénarios, et donc un plus large éventail d'incertitudes, que les MCR. D'autre part, les MCG ont une résolution très grossière (entre 250 et 600 km), ce qui ne permet pas d'inclure des caractéristiques précises de l'environnement; certains phénomènes peuvent ne pas être représentés de manière adéquate. Les simulations de MCR, en revanche, sont produites sur un maillage de plus haute résolution spatiale. Les aspects les plus pertinents à considérer lors du choix des simulations à utiliser pour élaborer un scénario sont la disponibilité des variables étudiées, la résolution adéquate pour représenter les phénomènes étudiés et la couverture de l'incertitude associée au changement climatique.

2.3.3 Prise en compte du changement climatique dans la conception des chaussées

Il existe trois approches couramment utilisées pour prendre en compte les changements climatiques dans la conception et l'entretien des chaussées : l'approche par scénario (descendante), l'approche basée sur les actifs (ascendante) et l'approche hybride (combinaison des approches descendante et ascendante). Les sections suivantes décrivent brièvement ces approches.

2.3.3.1 Approche par scénario (descendante)

Une approche basée sur des scénarios commence par le choix d'au moins deux scénarios climatiques futurs (estimation des émissions de GES) qui sont utilisés pour identifier les réductions possibles de la durée de vie des chaussées et promouvoir la résilience climatique par une meilleure conception des chaussées. Une fois que la sensibilité des chaussées aux scénarios climatiques choisis est quantifiée, les approches basées sur les scénarios peuvent être utilisées pour déterminer les alternatives d'adaptation, une série séquentielle d'actions d'adaptation et les coûts. La prise en compte des performances et des coûts estimés pour les chaussées à ces scénarios permet d'analyser de nombreuses alternatives d'adaptation au cours des 50 à 100 prochaines années, offrant aux praticiens la possibilité de comprendre les compromis entre diverses stratégies de gestion (Knott et al., 2019).

Un exemple de l'application de cette approche est le travail effectué par Bilodeau et al. (2015), où ils ont estimé l'influence que le changement climatique aurait sur la performance des chaussées en hiver en considérant trois scénarios d'augmentation des GES (pessimiste, moyen et optimiste).

2.3.3.2 *Approche basée sur les actifs (ascendante)*

L'approche basée sur les actifs évalue la sensibilité d'un actif aux conditions climatiques changeantes sans choisir un scénario de concentration de GES. Dans le cas de ce projet, l'actif à évaluer est la chaussée. Les combinaisons potentielles de facteurs climatiques qui affecteront la performance d'une chaussée (par exemple, l'augmentation des températures moyennes ou l'augmentation du niveau des eaux souterraines dans les zones côtières) peuvent être utilisées pour comprendre la sensibilité de la chaussée à des conditions climatiques ou environnementales futures plausibles tout en concevant pour les charges de trafic futures. L'approche est également capable de prendre en compte les changements potentiels au cours de la vie d'une chaussée ou la façon dont la conception de la chaussée affecte la fiabilité des performances (Knott et al., 2019). Cette approche permet aux praticiens de mieux comprendre la sensibilité des chaussées aux changements environnementaux incrémentiels non liés aux scénarios climatiques et peut être utilisée pour identifier les options d'adaptation.

La principale différence de l'approche basée sur les actifs par rapport à l'approche basée sur les scénarios est que les scénarios climatiques ne sont pas initialement choisis pour la conception des chaussées, mais sont uniquement utilisés pour identifier la plage plausible des paramètres climatiques ou environnementaux futurs (Brown et al., 2012; Taner et al., 2017). En d'autres termes, l'approche basée sur les actifs fournit une image complète de la réponse de la chaussée aux changements environnementaux progressifs, et l'approche basée sur les scénarios fournit des informations sur le moment d'un changement environnemental critique pour informer les activités de conception et d'entretien.

2.3.3.3 *Approche hybride*

Une approche hybride a été proposée par Knott, Sias, et al. (2019) pour intégrer le changement climatique dans la conception des chaussées et les activités de l'entretien. L'approche hybride utilise à la fois des approches ascendantes et descendantes. Une évaluation ascendante de la réponse de la chaussée souple à la charge sous de nombreuses combinaisons de facteurs de stress environnementaux/climatiques est réalisée pour quantifier la sensibilité de la chaussée aux conditions environnementales changeantes, et une évaluation descendante utilise des MCG et des projections de trafic pour déterminer la réponse de la chaussée aux conditions environnementales et aux charges futures plausibles. Cela fournit un cadre temporel pour les effets qui sont ensuite utilisés pour développer un plan d'adaptation.

2.4 Discussion

Un consensus scientifique est clair sur le fait que le climat change, et est en évolution, et sur le fait que ces tendances devraient s'accroître. Bien qu'il existe des incertitudes quant aux projections climatiques futures et à l'ampleur du changement climatique, il est possible de conclure que les systèmes de chaussées souples représentent des infrastructures à risque. De nombreuses études ont montré que les changements prévus réduiront les performances et la durée de vie des chaussées souples en raison de l'affaiblissement des matériaux existants dû à l'augmentation des températures et à la réduction de la résistance des couches de fondation engendrée par la saturation des sols. Bien que de nombreuses agences aient commencé à

anticiper le changement climatique en identifiant les actifs de transport vulnérables et en l'incluant dans le processus de planification, une inconnue majeure est la façon de modifier les pratiques de conception actuelles.

Les impacts environnementaux et les paramètres climatiques, tels que la température, les précipitations, la vitesse du vent, le pourcentage d'ensoleillement et l'humidité relative, ne sont pas pris en compte dans les directives actuelles de conception des chaussées, telles que celles de l'AASHTO-93 (AASHTO, 1993).

Actuellement, le MEPDG semble offrir les outils les plus complets pour évaluer les conditions des changements climatiques, étant donné sa capacité à prendre en compte la caractérisation de haut niveau des matériaux et à l'intégrer à un modèle environnemental complexe. L'EICM intégré à MEPDG peut aider à modéliser les effets du changement climatique pendant la phase de conception et permettre aux concepteurs d'étudier l'impact des paramètres climatiques sur la performance des matériaux liés et non liés pendant la période de conception de la route, pour finalement prendre des décisions de mitigation.

Un examen des modèles de performance des chaussées inclus dans le logiciel AASHTOWare PMED a été effectué dans le cadre de ce projet. Il a été constaté que les modèles de performance sont principalement associés à la réponse mécanique de la structure de la chaussée. Cette réponse mécanique est directement liée aux propriétés des matériaux affectés par les conditions de température et d'humidité. D'autres paramètres environnementaux sont pris en compte par le modèle climatique inclus dans le logiciel AASHTOWare PMED, comme l'humidité relative et le pourcentage d'ensoleillement. Ces paramètres sont utilisés pour estimer les variables ayant une influence directe sur les matériaux, comme la température de surface de la chaussée.

La teneur en humidité des matériaux granulaires et du sol est un paramètre directement pris en compte dans le modèle d'orniérage de ces matériaux. Ce paramètre est considéré à la fois dans le modèle structural (c'est-à-dire la modification du module résilient) et dans le modèle de performance. Cette variable est affectée à la fois par les précipitations et par le niveau de la nappe phréatique dans la structure. Ce dernier doit être pris en compte en particulier dans les zones côtières où la variation de la nappe phréatique peut être affectée pour le changement climatique.

Le logiciel AASHTOWare PMED calcule le nombre de cycles de gel-dégel au cours de chaque année et l'effet sur la performance de la chaussée. Dans la province de Québec, on s'attend à ce que le changement climatique entraîne un nombre plus important de cycles de gel-dégel pendant l'hiver en raison de l'augmentation des températures pendant cette saison. L'effet d'une augmentation du nombre de dégels hivernaux dans la province de Québec aurait un impact négatif sur les chaussées en provoquant une augmentation des dommages par déformation permanente dans la couche de fondation granulaire et des dommages par fatigue dans la couche d'enrobé bitumineux (Drolet, 2015). Pour l'horizon climatique 2011-2040, les chaussées souples du Québec pourraient subir une perte de durée de vie relative variant de 7 à 13 % en déformation permanente et une perte de durée de vie relative prévue de 5 à 8 % en dommage par fatigue.

Le soulèvement par le gel est un paramètre utilisé dans la province de Québec comme référence pour limiter l'effet de la saison hivernale sur la dégradation des chaussées. La corrélation du soulèvement par le gel avec l'IRI a été décrite par Sylvestre et al. (2019). Selon Drolet (2015), les changements climatiques prévus dans les prochaines décennies entraîneront une diminution des températures hivernales et auront un impact positif en réduisant les dommages aux chaussées causés par le soulèvement par le gel. La durée de vie relative devrait ainsi passer de 6 à 17 % pour l'horizon climatique 2011-2040. Cependant, étant donné l'expérience avec ce paramètre

dans la province de Québec, il pourrait être intéressant de l'inclure comme paramètre de soutien supplémentaire pour la conception des chaussées soumises aux changements climatiques.

L'intégration de l'étude de l'effet des changements climatiques dans les processus courants de conception et d'analyse des chaussées demeure un défi pratique. Compte tenu de l'incertitude liée à la projection du climat futur, associée aux multiples scénarios d'émissions de GES, son inclusion dans un processus de conception des chaussées n'est pas une tâche triviale. Trois approches pour inclure les effets du changement climatique dans la phase de conception des chaussées ont été présentées dans cette revue : l'approche descendante, dans laquelle la réponse de la chaussée à des scénarios d'émissions de GES est analysée ; l'approche ascendante, dans laquelle la sensibilité de la chaussée aux variables du climat et du trafic dans des plages futures probables est analysée ; et l'approche hybride dans laquelle les aspects ci-dessus sont combinés. L'approche hybride semble être l'option d'analyse la plus robuste ; cependant, son application peut être complexe et prendre du temps. Cela indique la nécessité de développer un outil ou un modèle de substitution pour permettre la conception des chaussées dans le cadre du changement climatique à partir d'une approche d'analyse des risques.

Pour réaliser une analyse fiable des effets du changement climatique sur les chaussées, il est nécessaire de procéder à des étalonnages locaux des modèles de performance des chaussées. La définition des plages de variables climatiques affectées par différents scénarios d'émissions de GES est également nécessaire. L'intégration des effets du climat sur la réponse mécanique de la chaussée avec un modèle climatique tel que l'EICM permet d'établir la base d'une analyse adéquate des effets qu'un futur changement climatique pourrait avoir sur les chaussées souples.

3. MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie définie pour le projet sur la base de ce qui a été trouvé dans la revue de la littérature présentée dans le chapitre précédent. Ce projet sera segmenté en deux aspects principaux : (1) l'étalonnage des lois d'endommagement incluses dans le logiciel AASHTOWare PMED, et (2) l'analyse de l'effet du changement climatique sur la durée de vie des chaussées souples dans la province de Québec. L'étalonnage sera fait sur la base de mesures de performance des chaussées sur le réseau routier du MTMD. Ensuite, les résultats des simulations climatiques dans le cadre du changement climatique seront utilisés dans le logiciel AASHTOWare PMED pour étudier l'influence de différents scénarios GES sur les performances des chaussées.

Compte tenu des informations disponibles, le projet se déroulera selon les étapes suivantes :

- a. Définition des sections de chaussée de référence pour l'étude.
- b. Caractérisation des matériaux, du trafic et du climat pour les sections de référence.
- c. Étalonage des modèles de performance dans le logiciel AASHTOWare PMED, à l'aide de l'outil CAT.
- d. Prévion des variables climatiques dans le cadre de deux scénarios de changement climatique (RCP 8.5 et RCP 4.5).

La Figure 8 montre de manière schématique comment les différentes étapes décrites dans la méthodologie seront liées aux autres étapes à réaliser.

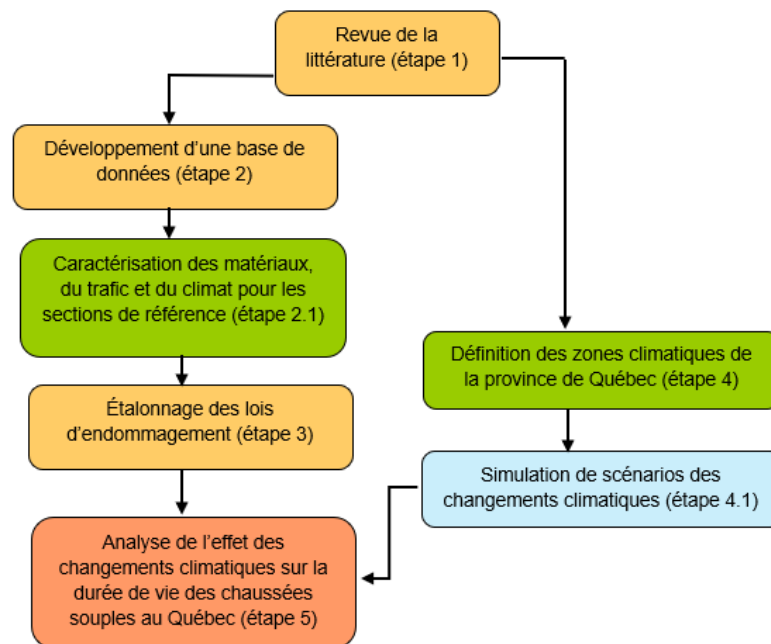


Figure 8 : Interaction des étapes de la méthodologie proposée pour le projet

3.1 Définition des sections de chaussée de référence pour l'étude

L'objectif de cette étape est de définir des sections avec des mesures de terrain disponibles pour supporter le processus d'étalonnage. Une base de données de sections d'au moins 300 m de longueur de chaussées souples dans leur premier cycle de vie (nouvelle construction ou reconstruction) sera constituée à cet effet. Elle sera extraite du système de gestion de chaussées du MTMD « GCH-6011 ». Toutes les sections répondant à des caractéristiques considérées comme représentatives des chaussées souples au Québec seront incluses dans cette base de données.

La base de données doit offrir des conditions et contenir des informations suffisantes pour être considérée comme représentative du réseau routier de la province de Québec. Le nombre de sections sera défini en fonction de la représentation adéquate des différentes zones climatiques et le trafic de la province de Québec. Le nombre de sections minimales requises est calculé à l'aide de l'outil CAT, qui utilise l'équation (41) en fonction de l'erreur tolérée (AASHTO, 2010) :

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{e_t} \right)^2 \quad (41)$$

Où,

N : le nombre minimal de sections de chaussée.

$Z_{\alpha/2}$: la valeur z d'une distribution normale standard (90% est recommandé).

σ : l'écart type de la performance maximale observée pour toutes les sections de l'ensemble de données d'étalonnage.

e_t : l'erreur tolérable, liée à l'erreur résiduelle entre les performances mesurées et prévues.

Le Tableau 7 indique l'erreur tolérable pour chaque indicateur de performance recommandé par l'AASHTO (AASHTO, 2010).

Tableau 7 : Erreur tolérable pour chaque indicateur de performance (AASHTO, 2010)

Indicateur de performance	e_t
Fissuration associée à des charges lourdes	2,5% de la surface
Orniérage	2 mm
Fissures sous contrainte thermique	55 m/km
Régularité de la surface (IRI)	0,5 m/km

3.1.1 Caractérisation des matériaux et du trafic des sections de référence

Les propriétés des matériaux de la chaussée et du trafic associées aux sections de référence seront définies. Pour cela, les variables d'entrée seront examinées avec les objectifs suivants :

- a. Déterminez le niveau hiérarchique souhaité pour chaque variable.
 - a. Niveau 1 : preuves spécifiques au site ou données de terrain.
 - b. Niveau 2 : facteurs régionaux et corrélations pour les propriétés des matériaux.
 - c. Niveau 3 : site typique ou valeurs par défaut.
- b. Déterminer si les valeurs par défaut données dans le logiciel AASHTOWare PMED sont adéquates ou si elles doivent être modifiées.
- c. Sélectionnez des plages acceptables pour les valeurs des variables.

Pour ce faire, la documentation du MTMD relative aux matériaux et au trafic dans la province de Québec sera utilisée.

3.1.2 Évaluation de performance des chaussées pour identifier les anomalies

Les données de performance pour chaque section de référence incluse dans l'échantillonnage seront examinées avant de passer aux phases suivantes. À cette étape, l'équipe veillera à ce que les mesures sur le terrain donnent des valeurs raisonnables dans le temps, et qu'elles soient représentatives de la performance typique de la chaussée. Si la performance d'une section est jugée non représentative, elle sera retirée de la base de données.

3.2 Étalonnage des modèles de performance dans le logiciel AASHTOWare PMED

À cette étape du projet, la procédure d'étalonnage décrite dans la section 2.2 de ce rapport sera suivie. L'outil d'étalonnage CAT sera utilisé à cet effet. Pour chaque section de référence dans la base de données d'étalonnage, un fichier sera généré dans le logiciel AASHTOWare PMED correspondant à la structure de la chaussée, de même qu'un fichier *csv sera généré avec les informations de performance de chaque section de référence. Les erreurs de prédiction seront évaluées et des ajustements seront apportés aux coefficients d'étalonnage par le CAT afin d'approcher le plus possible les prédictions du logiciel AASHTOWare PMED des performances réelles des chaussées en service dans la province de Québec (informations dans la base de données). Une proposition du niveau hiérarchique des variables d'entrée sera effectuée dans cette phase du projet.

3.3 Estimation des variables climatiques affectées par les changements climatiques

Les facteurs climatiques et leur évolution prévisible durant la période de vie utile des chaussées feront l'objet d'une attention particulière dans le projet. L'effet attendu des changements climatiques sur la durée de vie des chaussées dans la province de Québec sera évalué. Il est reconnu que les changements climatiques affecteront notamment les températures hivernales dans la province de Québec. Ils réduiront potentiellement les dommages associés au gel du sol d'infrastructure, mais augmenteront également le nombre de dégels hivernaux partiels (Bilodeau et al., 2015). Les étés marqués par l'augmentation de la température auraient également un impact négatif sur l'orniérage (Gudipudi et al., 2017, Swarna, 2021). De même, on peut s'attendre à une augmentation des précipitations dans le sud de la province de Québec (Thiam et al., 2013).

Les valeurs futures probables des variables d'entrée de l'EICM du logiciel AASHTOWare PMED seront établies pour différents scénarios climatiques afin d'analyser l'effet global des changements climatiques sur la performance des chaussées. À cette fin, des simulations de haute précision des effets des changements climatiques sur les variables de l'EICM seront réalisées en considérant des scénarios probables pour l'augmentation de la concentration des GES.

3.3.1 Définition des zones climatiques

Afin d'obtenir un échantillonnage adéquat des sections, une approche de zonage sera utilisée. Dans cette phase, les zonages présentés dans la section 2.3.1 de ce rapport seront utilisés comme référence. Le découpage de ces zones sera revu en tenant compte des variables d'intérêt de l'EICM couplé au logiciel AASHTOWare PMED. La manière dont ces variables évolueraient dans le cadre de scénarios de changements climatiques sera étudiée, et les zones présentant un comportement similaire seront identifiées. Une nouvelle subdivision des zones climatiques sera proposée si nécessaire, et sera utilisée pour évaluer la représentativité des différentes régions.

3.4 Projection climatique pour analyser l'impact du climat futur sur les performances des chaussées

Cette étape vise à identifier l'influence des changements climatiques sur la performance des chaussées dans les différentes régions du Québec à l'aide du logiciel AASTHOWare PMED.

3.4.1 Quantification de l'effet des changements climatiques sur les chaussées dans la province de Québec

À cette étape, des prédictions seront faites sur les performances attendues des chaussées dans différentes régions climatiques de la province de Québec. Le logiciel AASHTOWare PMED sera utilisé avec les modèles de performance étalonnés aux conditions du Québec (étape 1.1), en tenant compte des données climatiques actuels et des prévisions climatiques futures obtenues à partir des modèles de changements climatiques.

Pour tenir compte de l'effet des changements climatiques dans le logiciel AASHTOWare PMED, les résultats des simulations pour chaque variable climatique affectée par les changements climatiques seront utilisés au lieu de données climatiques MERRA2. De nouvelles stations météorologiques "synthétiques" seront créées sur la base des prévisions climatiques (résultat de l'étape 3.3) afin de simuler les effets du changements climatiques. L'analyse sera basée sur la comparaison entre la performance estimée pour une condition climatique de référence (1989-2020) et la performance attendue lorsqu'elle est affectée par les changements climatiques (2020-2069) associés à deux scénarios d'émissions de GES : RCP4,5 (scénario de stabilisation) et RCP8,5 (scénario pessimiste).

Cette étape vise à identifier les indicateurs de performance qui seront les plus touchés dans les différentes régions climatiques du Québec, afin d'identifier et d'isoler les facteurs à prendre en compte dans les corrections ou adaptations applicables pour les régions ou le type de dommage. Cela permet d'étudier si les effets les plus importants obtenus avec le AASHTOWare PMED sont les mêmes que ceux décrits par les différentes références de la littérature.

4. ZONES CLIMATIQUES SUR LA BASE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Un des objectifs de ce projet est d'utiliser les modèles calibrés du logiciel AASTHware PMED pour identifier les tendances d'endommagement des chaussées générées par les changements climatiques futurs attendus. Pour quantifier cet effet, l'identification des différentes zones de la province de Québec où les caractéristiques climatiques et leurs effets sur les changements climatiques sont homogènes est nécessaire. Le Ministère utilise actuellement des zones (1, 2 et 3) préalablement définies. Ce zonage permettra de sélectionner un échantillon représentatif de sections de chaussées pour l'étude des variables climatiques. Ce chapitre vise à résumer la procédure pour une proposition de zones climatiques basées sur le climat futur, telle que décrite à l'étape 3.3.1 de la méthodologie. L'annexe A comprend un rapport détaillé sur le processus réalisé.

4.1 Sensibilité aux variables climatiques

Pour ce projet, une analyse de sensibilité a été effectuée en considérant une chaussée typique et des plages de valeurs climatiques pour différentes stations météorologiques de la province de Québec. Ces variables ont été augmentées ou diminuées dans des plages de valeurs extrêmes pour évaluer l'influence sur la performance estimée dans le logiciel AASTHware PMED (v.2.6.1). Les stations météorologiques prises comme référence sont indiquées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Stations météorologiques utilisées comme référence dans l'étude de sensibilité

Référence	Coordonnées géographiques	
	Latitude (degrés)	Longitude (degrés)
Québec	47,00	-71,25
Montréal	45,50	-73,58
Temiscamingue	46,87	-78,54
Saguenay	48,40	-71,00
Sept-Îles	50,30	-66,89
Gaspé	48,86	-64,47

Le Tableau 9 montre les variations imposées pour les paramètres climatiques considérés au cours de l'étude. Les estimations faites pour la province de Québec ont été considérées pour la température et les précipitations. La valeur critique estimée par Christensen et al. (2007) d'une augmentation de 30% des précipitations dans le sud du Québec a été utilisée, tandis que la valeur extrême estimée par Lepage et al. (2012) d'une augmentation de 0,4 °C/an a été utilisée comme référence pour la température. Pour le reste des variables, en l'absence de références directes pour la province de Québec, une variation a été imposée en considérant les pourcentages d'augmentation et de diminution de leurs valeurs moyennes annuelles.

Tableau 9 : Plage de modification des variables climatiques pour l'analyse de sensibilité

Variable climatique	Diminution	Augmentation
Température annuelle moyenne (°C)	0 °C	+10 °C
Précipitations (mm)	0 %	+30%
Vitesse du vent (kph)	-10%	+10%
Ensoleillement (%)	-10%	+10%
Indice de gel (°C jour) ^a	-30%	+30%

^a La variation de l'indice de gel est le résultat de la variation de la température moyenne annuelle.

La sensibilité fait référence à la différence absolue moyenne, en pourcentage, entre les indicateurs de performance estimés avec les informations climatiques et les indicateurs de performance lorsqu'on impose de modifier les informations climatiques avec les conditions présentées dans le Tableau 9.

La Figure 9 présente la sensibilité des indicateurs de performance par rapport à la variation de chaque variable climatique dans le logiciel AASHTOWare PMED (version 2.6.1). Il est possible de voir que la température et l'indice de gel sont les paramètres les plus touchés par les changements climatiques avec une sensibilité moyenne de 14,4% et 34,6% respectivement, sur les plages de valeurs évaluées. En ce sens, leurs effets sur la conception des chaussées requièrent une attention particulière. Compte tenu de ce qui précède, ce sont les variables qui pourront être considérées comme les plus importantes pour l'optimisation du zonage climatique dans la province de Québec pour un climat futur.

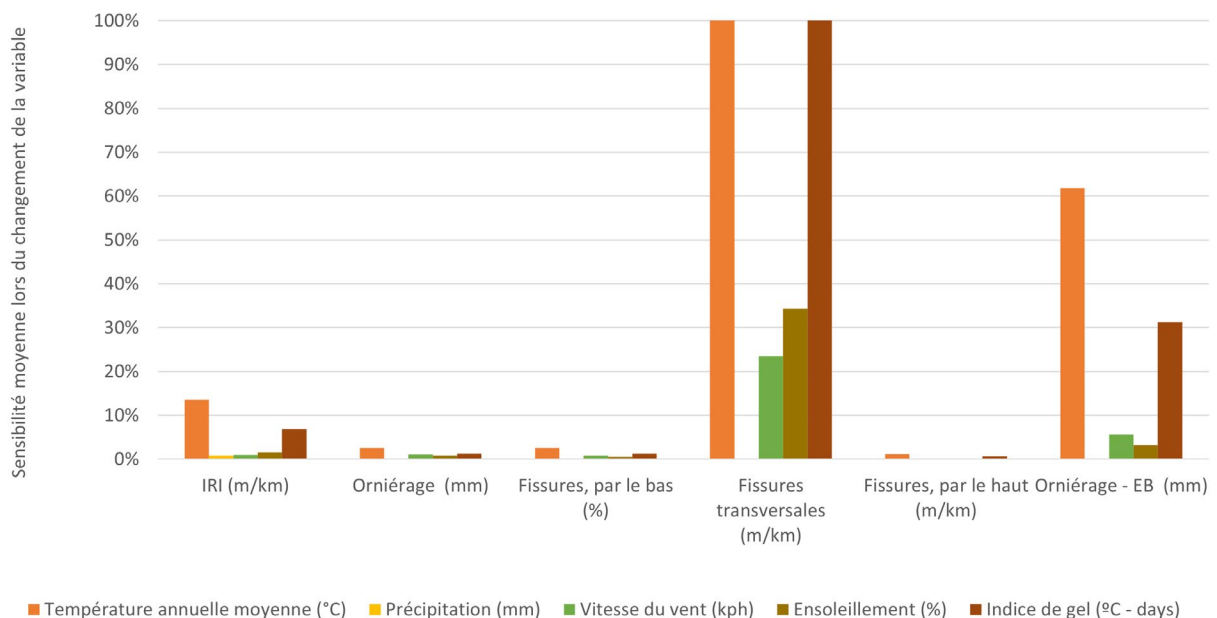


Figure 9 : Sensibilité des indicateurs de performance aux variables climatiques

4.2 Modèles climatiques et simulations

Pour identifier les zones dont les régions climatiques présentent une sensibilité aux changements climatiques, des simulations à ultra-haute résolution ont été utilisées (4 km). Ces simulations ont été développées à l'aide d'une version à zone limitée du modèle Global Environmental Multiscale (GEM). Initialement, une simulation GEM avec une résolution de 4 km, basée sur ECMWF's ERA5, a été réalisée pour la période 1989-2010. Ces simulations correspondent aux caractéristiques climatiques actuelles et ont été validées avec les observations disponibles dans le réseau et aux stations disponibles (voir ANNEXE A). Cette simulation est dénommée ci-après GEM4_ERA5. En plus, des simulations de changements climatiques ont été effectuées sur la période 1989-2069 avec des résolutions de 4 km et de 10 km pour le scénario RCP8,5 (Representative Concentration Pathway). Le RCP8.5 correspond au scénario d'émissions de GES le plus élevé sans aucun objectif spécifique d'atténuation des émissions (scénario pessimiste). Pour les simulations d'une résolution de 4 km, le modèle GEM réduit dynamiquement l'échelle pour un ensemble des conditions initiales provenant du modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (CanESM2). Ces deux simulations sont nommées GEM10_CanESM2 (résolution horizontale de 10 km) et GEM4_CanESM2 (résolution horizontale de 4 km). La liste des simulations GEM considérées dans cette étude est résumée dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Simulations considérées dans cette étude

Simulation	Basé sur	Période	Résolution horizontale
GEM4_ERA5	ERA5	1989-2010	4 km
GEM10_CanESM2	CanESM2	1989-2069 ^a	10 km
GEM4_CanESM2	GEM10	1989-2069 ^a	4 km

^a Scénario RCP8,5

Les changements projetés de la température moyenne annuelle et de l'indice de gel pour la période 2041-2069 par rapport à la période 1991-2020 sur la base de GEM10_CanESM2 sont présentés à la Figure 10, en utilisant la simulation GEM10_CanESM2 pour cette phase d'analyse. Le taux de changement dans la Figure 10 est estimé comme la pente de la ligne de meilleur ajustement passant par les valeurs moyennes sur 30 ans séparées par des périodes de 10 ans (c'est-à-dire 1991- 2010, 2001-2030, 2011-2040, 2021-2050, 2031-2060, et 2041-2069).

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

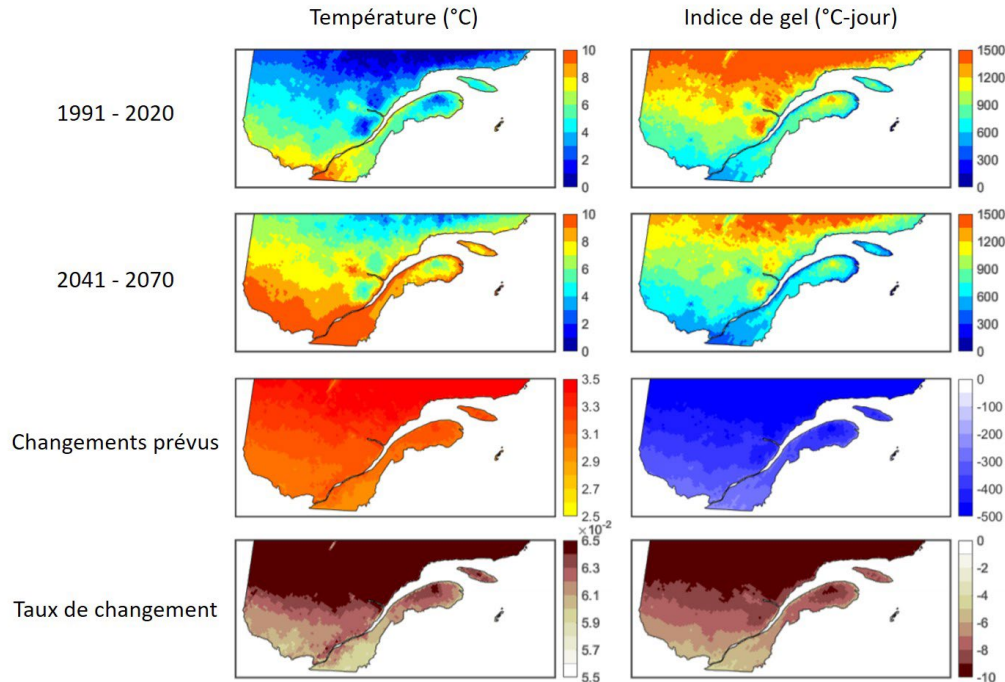


Figure 10 : Température annuelle moyenne et indice de gel obtenu à partir de GEM10 pour les périodes actuelles 1991-2020 et futures 2041-2070, et leurs taux de changement

En général, des augmentations des températures annuelles moyennes sont observées dans une fourchette de 3 à 4 °C, avec des augmentations plus significatives pour les parties nord du Québec. Par conséquent, l'indice de gel devrait diminuer considérablement au Québec, avec des taux de changement allant de -5 à -10 °C jours par an.

En se basant sur les modèles de changement prévus pour la température moyenne et l'indice de gel discuté ci-dessus, en particulier le taux de changement, une proposition alternative de la carte de sélection des bitumes du MTMD (voir Figure 6) peut être envisagée afin de redéfinir les zones climatiques. Premièrement, la zone 2 peut être élargie pour englober les régions du sud-ouest du Québec, car elles présentent des tendances similaires en termes de taux de changement des deux variables. Deuxièmement, les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie présentent des valeurs de taux de variation légèrement plus élevés que le reste de la zone 2, tant pour la température que pour l'indice de gel. Cette zone pourrait donc être considérée comme une zone indépendante. Ceci est cohérent avec les conclusions de Perron-Drolet (2015). La Figure 11 montre les modifications proposées des zones en considérant les taux de changement des températures annuelles moyennes et des indices de gel.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

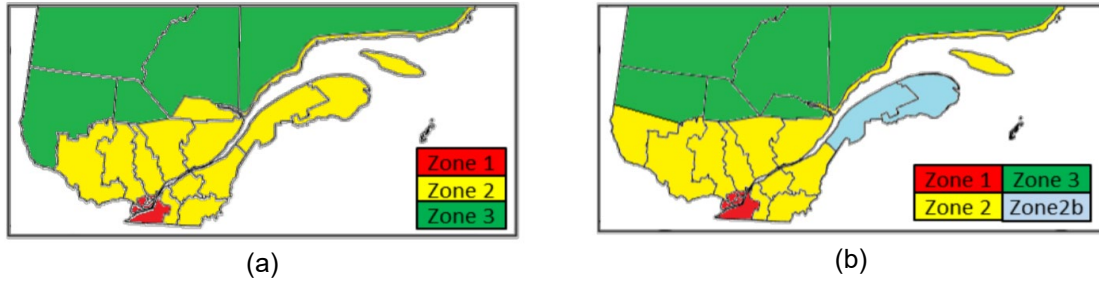


Figure 11 : (a) Zones actuelles définies par le MTMD pour la sélection du bitume, (b) modifications potentielles de ces zones en tenant compte des caractéristiques climatiques futures

La division des zones climatiques résultant des simulations (voir Figure 11b) a été révisée en appliquant les informations disponibles au système de gestion de chaussée « GCH-6011 ». Pour cela, les territoires et les municipalités régionales de comté (MRC) ont servi de référence. La carte de zonage considérée pour cette étude est présentée dans la Figure 12 suivant une nomenclature des zones, de 1 à 4. Chacune de ces zones présente des caractéristiques climatiques différentes qui doivent être prises en compte.

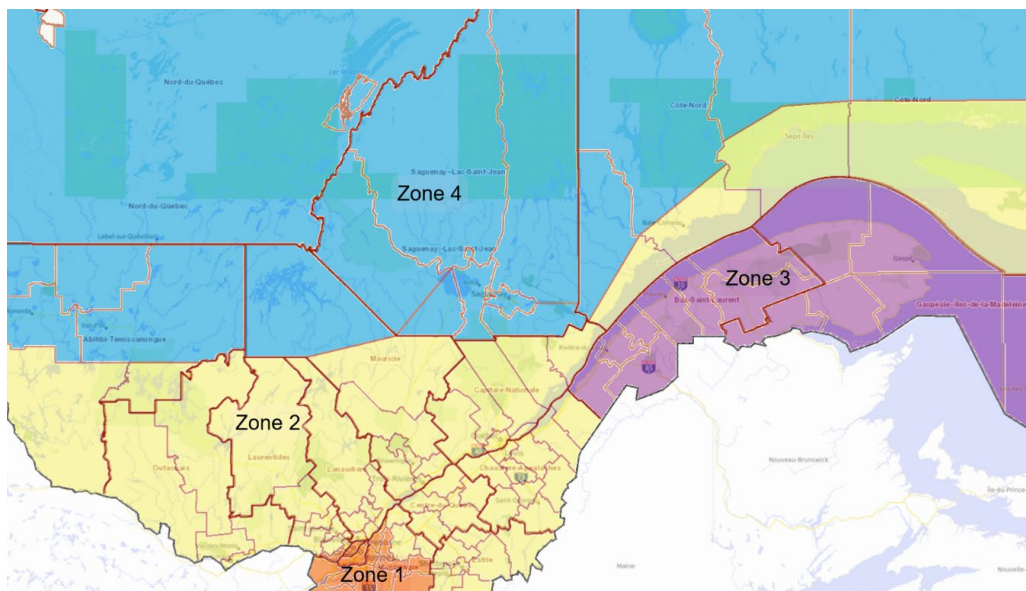


Figure 12 : Zones climatiques considérées pour la province de Québec

5. ÉCHANTILLONNAGE DES SECTIONS DE RÉFÉRENCE POUR L'ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PMED

L'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED nécessite préalablement le développement d'une base de données contenant les principales informations sur la performance et les caractéristiques de sections de chaussées représentatives des conditions du Québec. Des sections de référence seront définies et serviront par la suite comme entrées dans le processus de calibration. Cet échantillonnage constitue un défi majeur dans la mesure où ces sections de référence doivent être suffisamment représentatives des conditions structurales, environnementales et de trafic attendu dans la province de Québec.

5.1 Méthodologie de sélection

5.1.1 Critères de base

Les sections répondant aux critères de sélection de base (Tableau 11) ont été extraites du système « GCH-6011 ». L'objectif est de définir un groupe relativement homogène de sections et de caractéristiques souhaitables pour le processus d'étalonnage. Un total de 353 sections a été retenu pour l'évaluation initiale. La Figure 13 présente la répartition de ces sections dans la province de Québec.

Tableau 11 : Critères généraux pour la sélection des sections de référence

Critères de sélection	Condition d'éligibilité
Revêtement	Souples
Classe fonctionnelle	Autoroute, Nationale et Régionale
Milieu	Rural, Sub-Urbain ^a et Urbain ^a
Longueur (km)	Min. 300 m (0.30 km)
Âge du revêtement	6 à 25 ans
Taux dégradation élevé orniérage	Non

^a S'applique uniquement à la Zone 1 (région de Montréal et Montérégie)

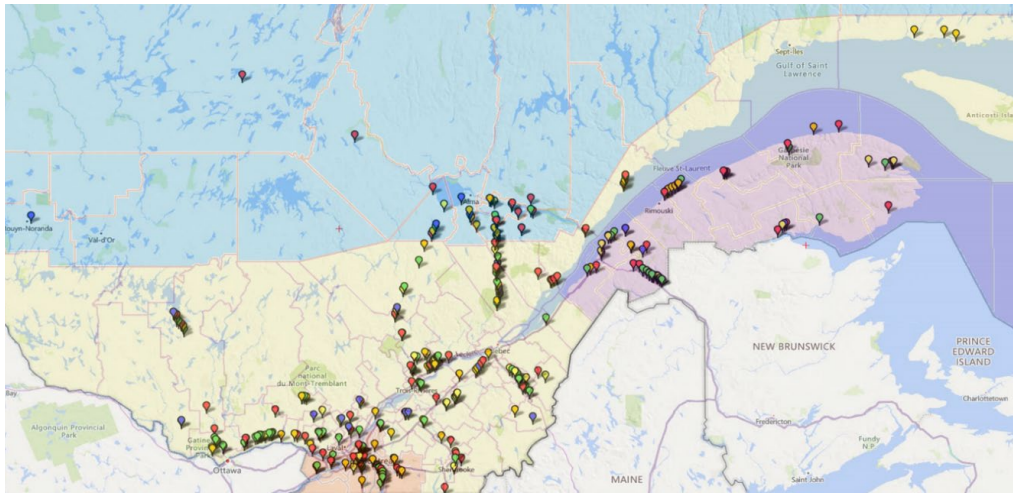


Figure 13 : Répartition des sections dans la province de Québec

Un code couleur associé à l'indice d'état gouvernemental de la section selon la classification utilisée par le Ministère est inclus (Tableau 12). Cela permet une évaluation visuelle de la distribution géographique et du niveau de service des sections choisies pour l'étalonnage des modèles de dégradations.

Tableau 12 : Couleurs utilisées pour représenter l'indice d'état

Indice d'état gouvernemental	Couleur du point
A (Très Bon)	Bleu
B (Bon)	Vert
C (Satisfaisant)	Jaune
D (Mauvais)	Orange
E (Très mauvais)	Rouge

5.1.2 Évaluation des informations disponibles dans les sections

Un examen des caractéristiques spécifiques de chaque section retenue lors de la phase précédente a été effectué. Les points suivants ont été analysés pour chaque section :

- Informations sur la structure : les sections pour lesquelles les informations sur la chaussée n'étaient pas disponibles ou seulement partiellement disponibles ont été écartées.
- Présence d'une couche d'isolation ou d'un géotextile : les sections de chaussée comportant ce type de matériau ont été écartées.
- Présence de ponts, viaducs et autres : Les sections où la position de toute structure pouvait affecter la performance de la chaussée ont été exclues.
- Géométrie de la route : les éléments géométriques tels que les courbes, les pentes et les intersections qui pourraient affecter les performances de la chaussée ont été écartés. Néanmoins, si la tendance des performances de la chaussée est cohérente, ces sections n'ont pas été écartées car elles sont considérées comme représentatives des conditions typiques de la chaussée.

Le système DIR « Service de diffusion du Laboratoire des chaussées » a été utilisé pour évaluer les caractéristiques physiques et géométriques des segments de route. La Figure 14 montre des exemples de différentes conditions.

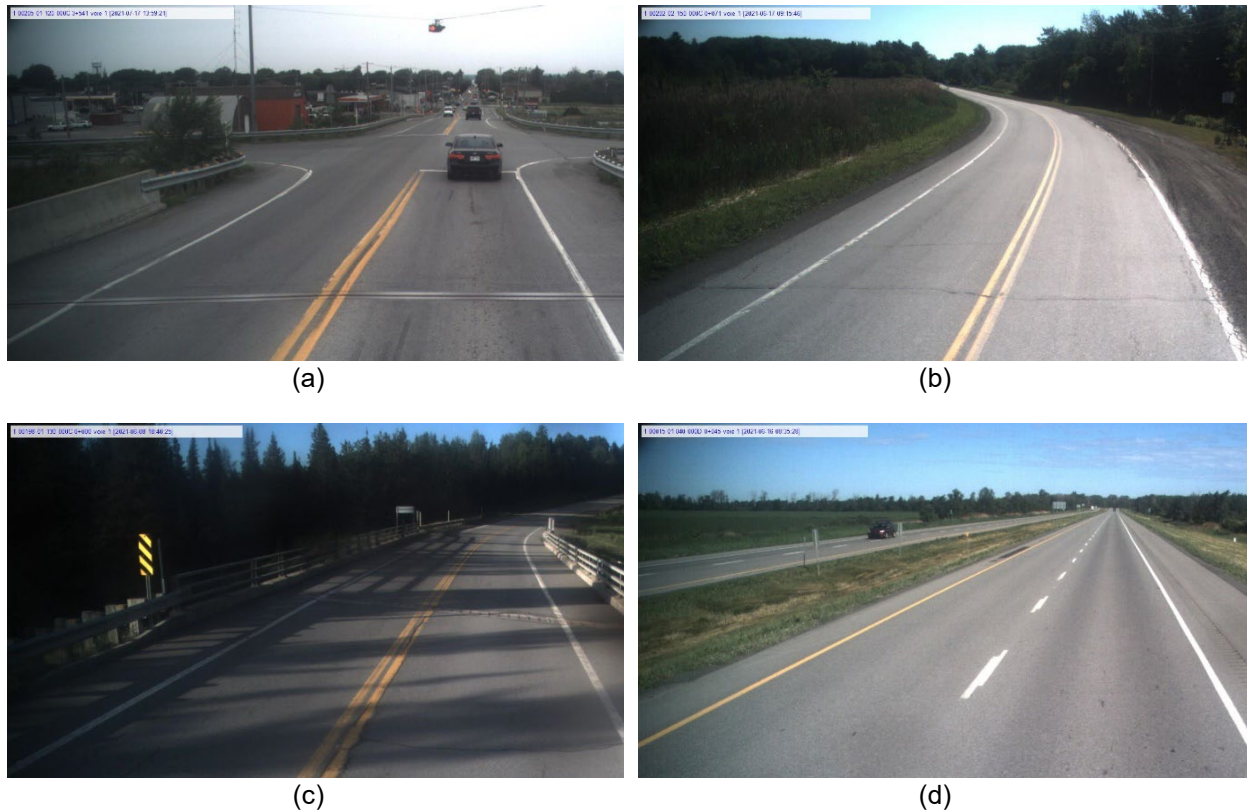


Figure 14 : Conditions dans les sections de référence. (a) intersection de deux routes, (b) présence de courbes prononcées, (c) présence de ponts et, (d) segment dans des conditions souhaitables

5.1.3 Évaluation des performances mesurées sur le terrain

Des indicateurs de performance ont été mesurés pour les sections retenues lors de la phase précédente. La performance de la chaussée est rapportée comme la moyenne des mesures par segments de 100 mètres sur toute la longueur de la section étudiée. La méthode de calcul est détaillée dans la Section 5.2 de ce rapport.

Les sections retenues dans la dernière phase du processus de sélection sont considérées comme appropriées pour le processus d'étalonnage des modèles de performance du logiciel AASHTOWare PMED. Dans ces sections, la tendance des indicateurs de performance a été évaluée afin d'identifier l'intervalle de temps à considérer. Cette période s'étend de l'année de construction ou de reconstruction de la chaussée à l'année où la première action d'entretien/réhabilitation ayant une influence sur l'évolution de la performance a été effectuée. Un exemple de cette évaluation est donné à la Figure 15, où une section de chaussée construite en 2008 montre un comportement de détérioration logique (croissant) jusqu'en 2018, jusqu'à ce qu'une activité de réhabilitation ait été réalisée, améliorant l'état fonctionnel de la section. Pour

cette section, seul le comportement entre les années 2008 et 2018 serait considéré pour l'étalonnage.

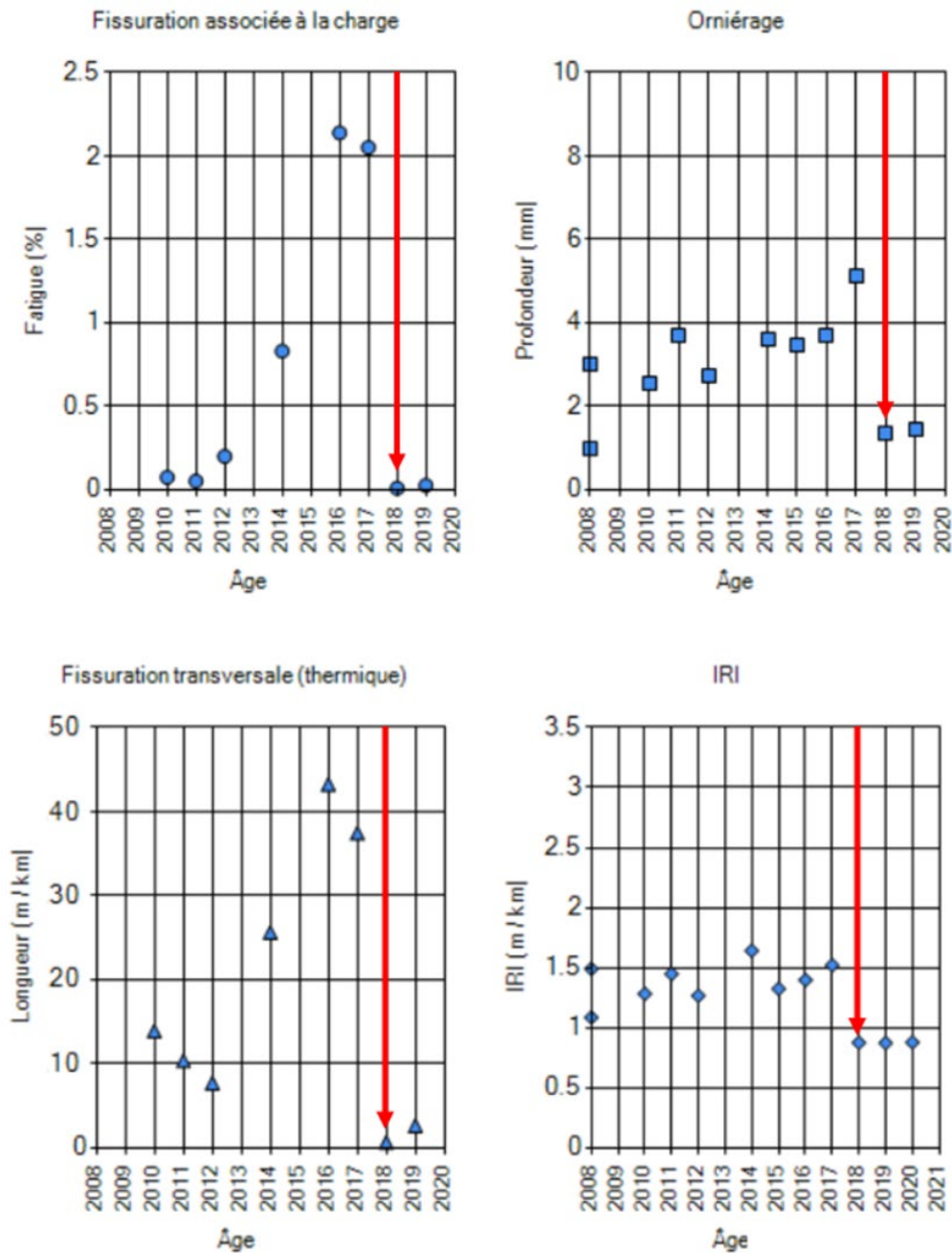


Figure 15 : Critères relatifs à l'intervalle de temps à utiliser pendant le processus d'étalonnage

Le traitement des informations extraites des bases de données du MTMD a été effectué à l'aide d'un logiciel développé à cet effet par l'équipe de recherche. Le logiciel répond aux objectifs suivants :

- a. Calcul des indicateurs de performance (fatigue, orniérage et IRI).

- b. Présentation des données sous une forme unifiée (structure, performance, trafic et localisation).
- c. Génération d'un fichier *.csv dans le format à utiliser par CAT, un outil d'aide à l'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED.

En utilisant ce logiciel, il est possible de sélectionner les indicateurs de performance à considérer pour chaque section. Cela permet de maximiser le nombre de sections qui peuvent être considérées pour le processus de calibration. La Figure 16 montre les informations présentées dans le logiciel.

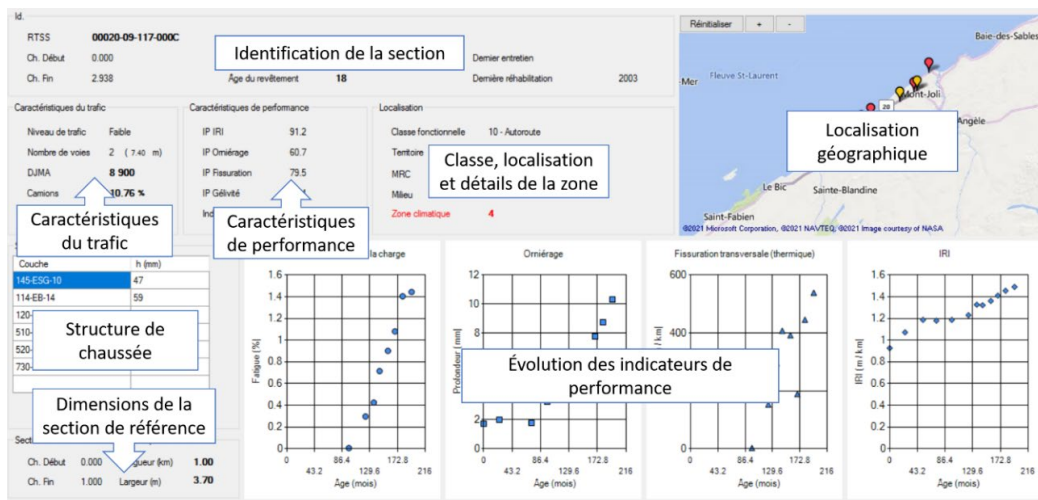


Figure 16 : Informations affichées dans le logiciel de visualisation MTMD-CAT

À l'aide de l'outil de cartographie SIGO, les coordonnées géographiques des sections ont été identifiées. Ceci a entre autres été fait afin de faciliter l'identification ultérieure du type de sol et des variables climatiques pour chaque section.

5.2 Calcul des indicateurs de performance

Dans l'optique de refléter l'état des chaussées, un ensemble des indicateurs de performance est souvent impliqué lors du processus d'étalonnage. Outre l'Indice de Rugosité International, les déformations (orniérage) et les fissurations (fissures en piste de roues par le bas, fissures longitudinales par le haut, fissures transversales) sont également considérées. Pour chaque section de chaussée, la valeur moyenne de différentes mesures par segments de 0,1 km (telle que données par le système « GCH-6011 ») sera utilisée comme référence, tout en considérant la variabilité implicite dans la même section de chaussée (telle que la variabilité liée à la construction et aux matériaux). Il doit être précisé que, selon la méthodologie utilisée pour définir les indicateurs de performance, les sections plus courtes ont la même importance que les plus longues dans le processus de calibration. La quantification de la performance des chaussées pour l'IRI, l'Orniérage et les Fissurations est détaillée dans les sections suivantes.

5.2.1 Fissuration

Trois types de fissuration associés à des mécanismes différents peuvent être pris en compte dans le logiciel AASHTOWare PMED (voir sections 2.1.4.2 et 2.1.4.3), soient :

- Fissures longitudinales dans les pistes de roues initiées par le bas : identifié comme le pourcentage de la surface totale de la bande affectée par la fissure (%).
- Fissures longitudinales dans les pistes de roues initiées par le haut : identifié en mètre par kilomètre (m/km).
- Fissures transversales (thermiques) : identifié en mètre par kilomètre (m/km).

L'évaluation des fissures est effectuée selon cinq bandes distinctes sur la chaussée, comme le montre la Figure 17. Dans la segmentation, les bandes 2 et 4 correspondent aux pistes des roues, et les bandes 1, 3 et 5 aux zones non affectées par les roues.

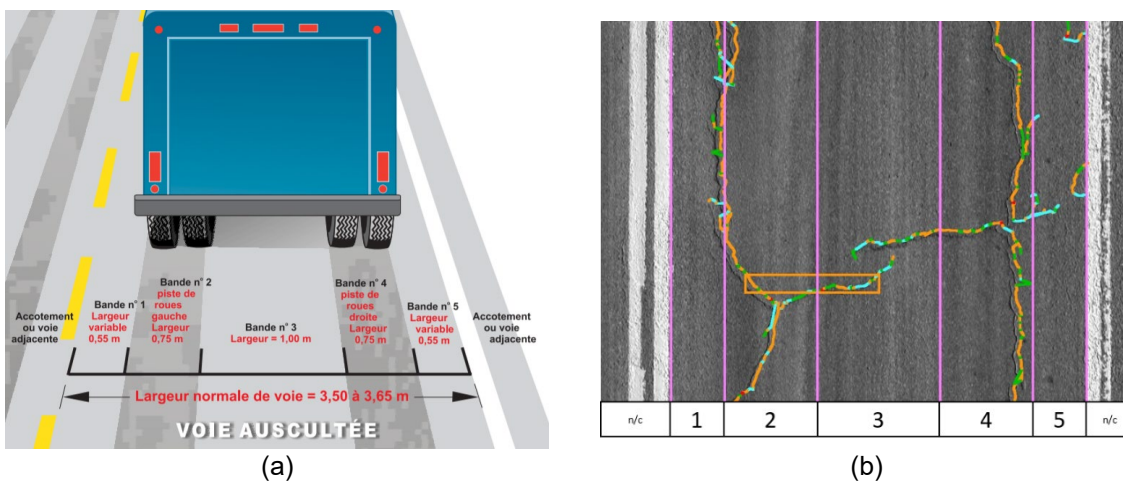


Figure 17 : Numérotation des bandes de la chaussée pour l'auscultation des fissures. (a) représentation des bandes sur la route (Bernard & Brodeur, 2002), (b) échantillon de mesure réel

Pour calculer le pourcentage total de la surface affectée par les fissures en piste de roues, la longueur totale des fissures dans les bandes 2 et 4 (en m) est multipliée par 1 pi (0,3048 m) (AASHTO, 2010), puis divisée par la surface totale de voie en mètres carrés (m²). L'équation 42 est utilisée pour ce calcul :

$$F_{pr} = \left(\frac{(L_2 + L_4) \times 0,3048}{H \times (0,1 \times 1000)} \right) \times 100\% \quad (42)$$

Où, F_{pr} est la fissuration en piste de roues, en pourcentage, L_i est la longueur de la fissure, en mètres, dans la bande i (voir a), et H est la largeur de voie dans la section de référence, en mètres. La différenciation entre fissures par le bas et par le haut doit être faite en utilisant la méthode décrite dans la section 2.1.4.2.3 et le Tableau 5. Cette information n'ayant pas été obtenue dans le cadre de ce projet, les deux catégories ont été fusionnées pour l'analyse.

Pour le cas de la fissuration transversale, les enregistrements du système GCH-6011 du MTMD seront pris directement (en m), et ces valeurs seront divisées par la longueur de référence (0,1km).

5.2.2 Déformations de la surface

Le logiciel AASHTOWare PMED considère l'orniérage total comme un indicateur de la déformation de la surface (voir section 2.1.4.1). Dans cette étude, l'unité utilisée pour la profondeur des ornières est le millimètre (mm). Les valeurs d'orniérage à utiliser pendant le processus d'étalonnage sont extraites directement du système GCH-6011 du MTMD.

5.2.3 Indice de confort au roulement

Le logiciel AASHTOWare PMED utilise l'indice de rugosité international (IRI) comme indicateur de l'état général de la chaussée (voir section 2.1.4.4). Dans cette étude, les unités utilisées pour l'IRI sont les mètres par kilomètre (m/km). Les valeurs d'IRI à utiliser pendant le processus d'étalonnage sont extraites directement du système GCH-6011 du MTMD.

5.2.4 Critères de cohérence des performances calculées

Les indicateurs de performance sont calculés comme la moyenne des valeurs mesurées sur toute la longueur de la section concernée. Ces mesures sont rapportées à intervalles réguliers de 0,1 km; cependant, sur toute la longueur de l'étude, la variabilité entre les valeurs rapportées peut être considérable.

Afin d'éviter de prendre en compte des mesures avec des valeurs extrêmes et d'améliorer la représentativité de la performance de la chaussée, des limites de validité sont proposées pour chaque section. Les valeurs de ces limites sont calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$x_{limite} = \bar{x} \pm Z \times \sigma \quad (43)$$

Où,

x_{limite} est la valeur de la limite supérieure ou inférieure.

\bar{x} et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type, calculés à partir des mesures de terrain. Z est une valeur associée à la probabilité cumulative dans une distribution normale. Pour cette étude, $Z = 1,28155$ (fiabilité de 90%).

La Figure 18 montre un exemple de l'application de ce principe sur une section de chaussée typique. Sur cette figure sont indiquées les limites de validité, déterminées à l'aide de l'équation (43), les mesures à écarter, et la performance moyenne corrigée en écartant les valeurs extrêmes.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

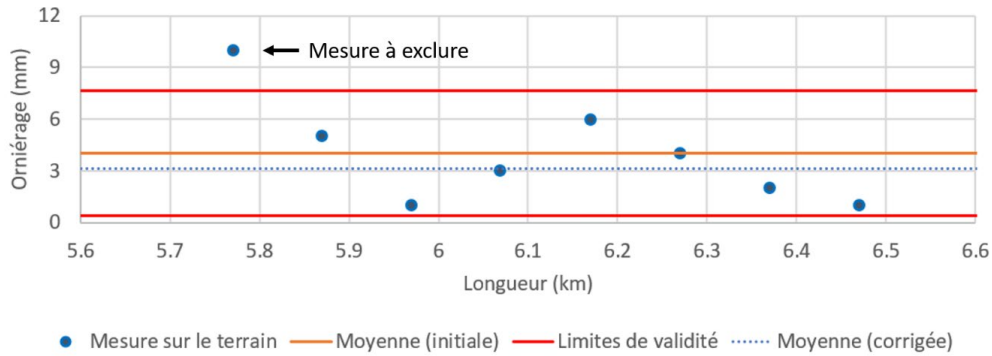


Figure 18 : Élimination des valeurs extrêmes dans les mesures sur le terrain

5.3 Sections de référence retenues

Dans le cadre de l'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED, seuls les tronçons répondant aux critères de structure et de géométrie considérés comme représentatifs des conditions de la province de Québec ont été sélectionnés. Sur les 353 tronçons de chaussée souple échantillonnés initialement, 30,59 %, 54,52 %, 22,66 % et 51,84 % des projets ont été sélectionnés respectivement pour les indicateurs de fissuration longitudinale de fatigue (FC), d'orniérage (O), de fissuration transversale (FT) et d'indice de rugosité international (IRI) (Figure 19). Le nombre de projets pour chaque type de dégradation est conforme aux exigences minimales de calibration local établies par l'AASHTO (équation (41), AASHTO, 2010). L'échantillonnage final a été réalisé en tenant compte de divers critères, tels que la tendance de la réponse des dommages, la pertinence des données et les informations sur la structure des routes. En outre, l'éligibilité d'une section dépend de l'âge du revêtement (entre 6 et 25 ans, selon le tableau 11 de la section 5.1.1) et de la disponibilité des données de trafic pendant la période d'analyse (de l'année de construction à la fin de la durée de vie).

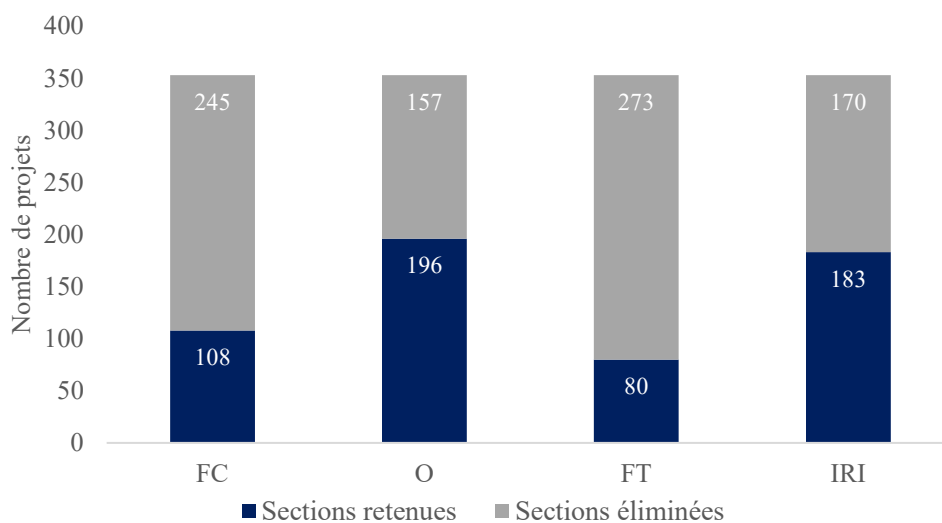


Figure 19 : Statistiques sur les sections de référence pour chaque type de dégradation

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

Les données mesurées sur le terrain ont été inspectées visuellement à travers le logiciel développé par l'équipe de recherche afin de détecter les anomalies et les tendances irrégulières étant susceptibles d'affecter la qualité de l'exercice de calibration. La synthèse de telles observations étaient :

- a. Un pourcentage de 16,15%, représentant 57 projets avec des informations manquantes sur la structure de la chaussée, a été éliminé (Figure 20).

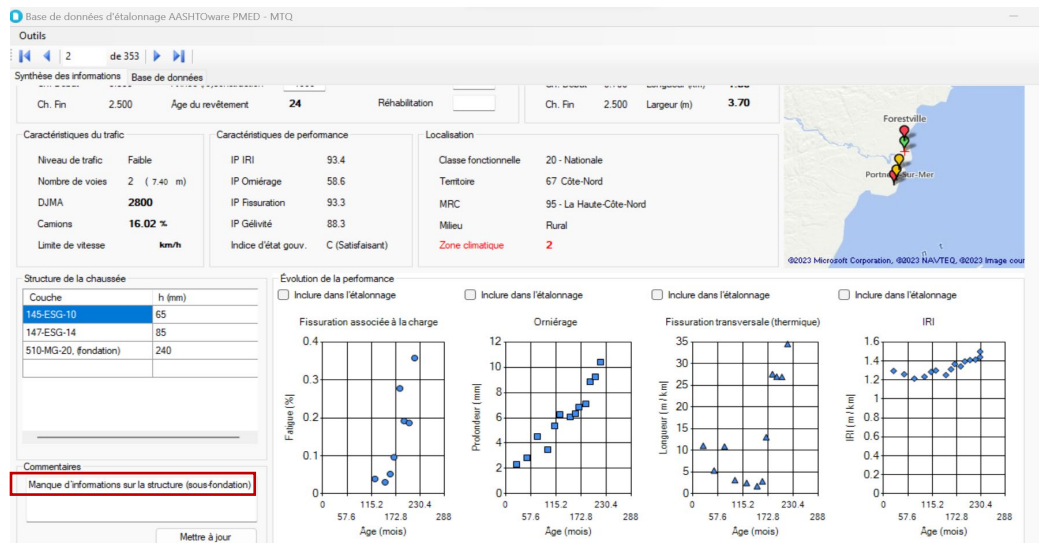


Figure 20 : Exemple de critère de sélection : Manque d'informations (Projet 2)

- b. L'exclusion d'un grand nombre de projets pour la caractérisation de la fissuration longitudinale de fatigue, l'Orniérage, la Fissuration Transversale et l'IRI était justifiée essentiellement par des tendances parfois erratiques des courbes d'endommagement. Une distribution atypique de certaines données de performance mesurées en fonction du temps a causé le rejet de respectivement 94, 22, 113 et 25 sections de l'échantillon d'étude. Des exemples des diverses anomalies identifiées sont fournis à la Figure 21.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

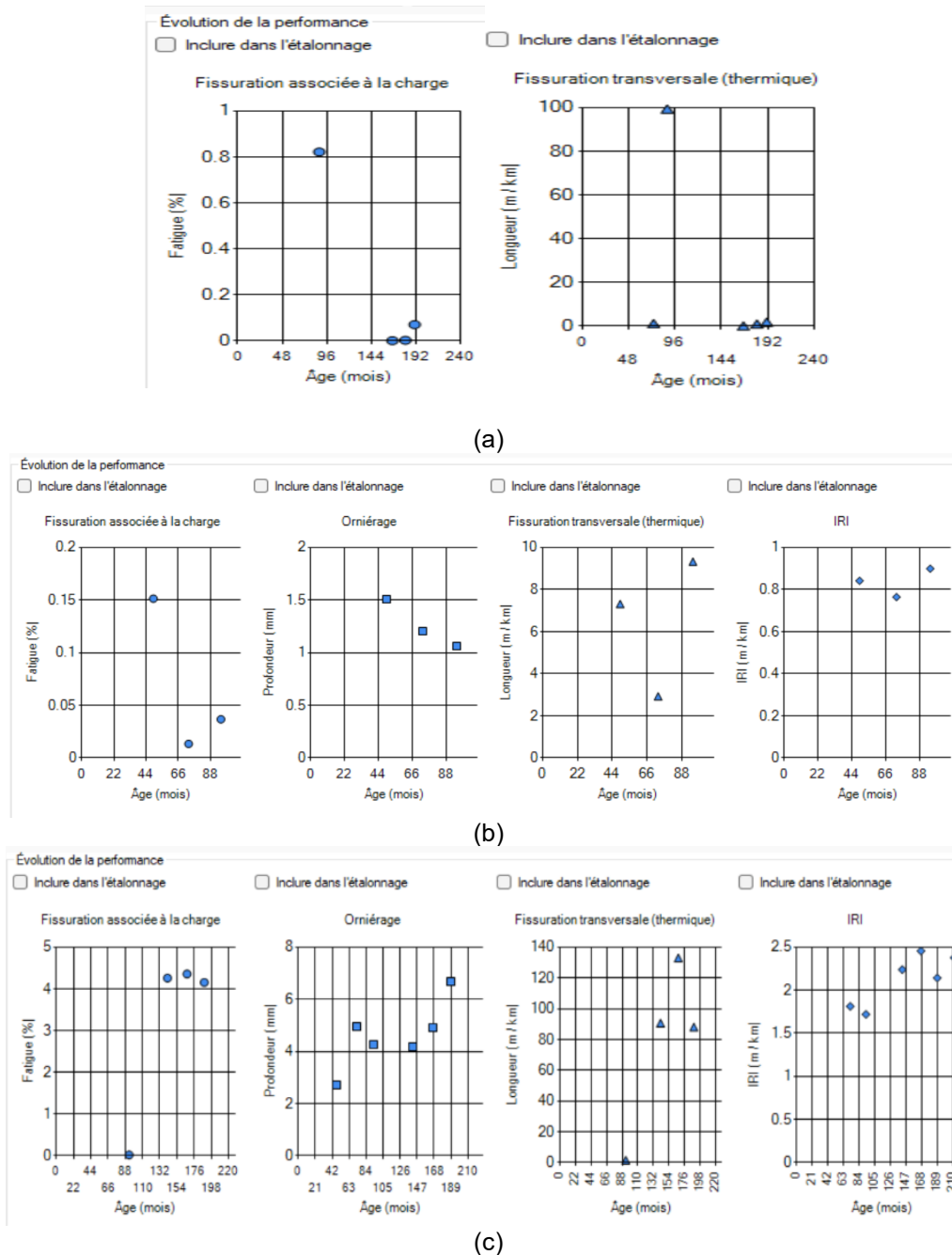


Figure 21 : Exemple de critère de sélection : Tendance atypique. (a) fissuration longitudinale de fatigue et Fissuration Transversale (Projet 13), (b) pour la fissuration longitudinale de fatigue, l'orniérage, la Fissuration Transversale et l'IRI (Projet 75) et, (c) pour la fissuration longitudinale de fatigue, l'orniérage, la Fissuration Transversale et l'IRI (Projet 53)

Des critères additionnels sur lequel portait le processus d'échantillonnage comportait la présence ou non d'un pont au début du tronçon, la présence de géotextiles, d'une couche isolante et l'intersection avec des voies ferrées :

- a. Au final, 8, 4, 6 et 1 projets ont été respectivement exclus de l'ensemble de sections de référence (Figure 22).

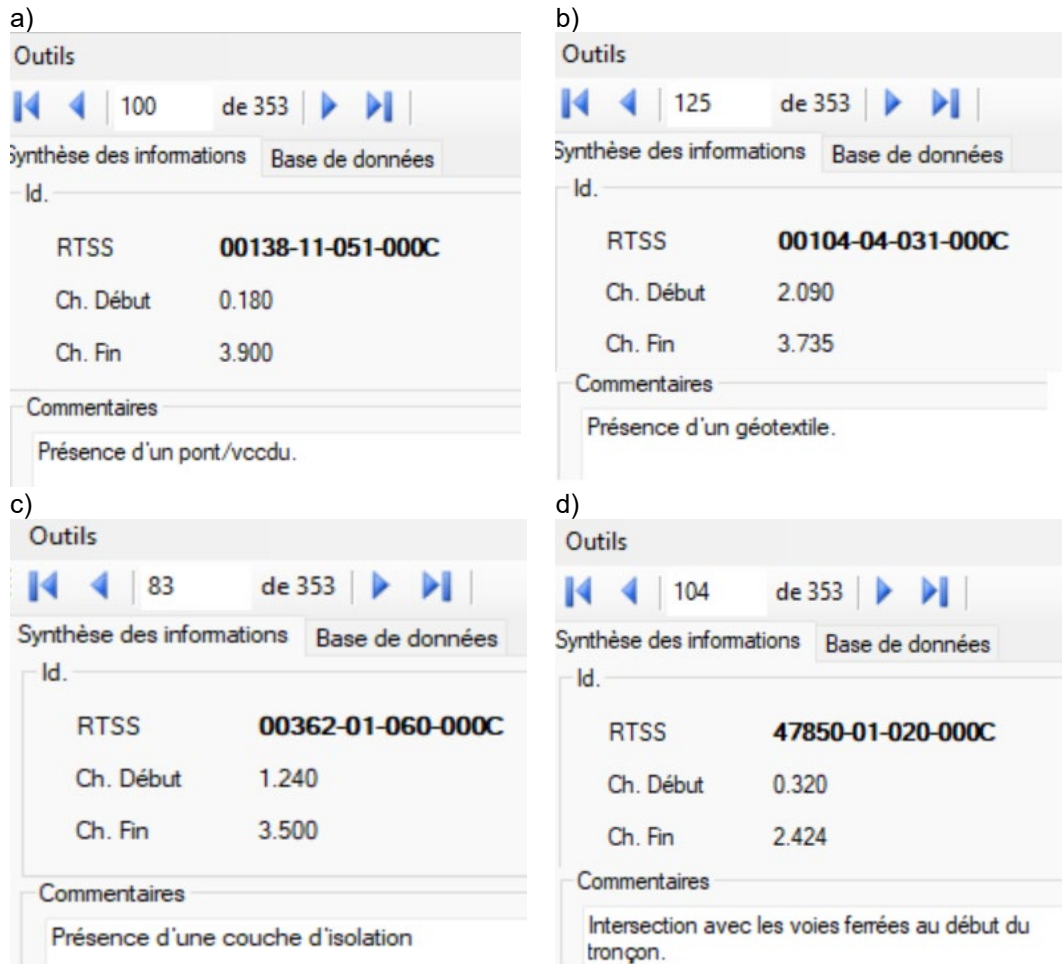


Figure 22 : Exemple de critère de sélection. (a) présence d'un pont au début du tronçon, (b) présence de géotextiles, (c) présence d'une couche isolante et, (d) intersection avec des voies ferrées

En vue de maximiser la qualité des extraits du processus de calibration sous l'outil CAT, un raffinement de diverses courbes d'endommagement a été envisagé. Cet ajustement consistait à éliminer certaines valeurs aberrantes contrastant avec les données mesurées. Plus spécifiquement, cet exercice consistait en un ajustement au début et/ou à la fin des courbes afin de sélectionner une sous-période représentative dans l'ensemble des observations globales qui étaient disponibles pour affiner davantage leurs tendances générales. Par exemple, comme illustré à la Figure 23 et la Figure 24, des points aberrants ont été observés :

- À 26 mois pour l'orniérage pour une profondeur de 1,5 mm (Figure 23a).
- À 42 mois pour la fissuration transversale pour une valeur de 44 m/km (Figure 23a).
- À 157 mois pour l'IRI pour une mesure de 0,62 m/km (Figure 24a).

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

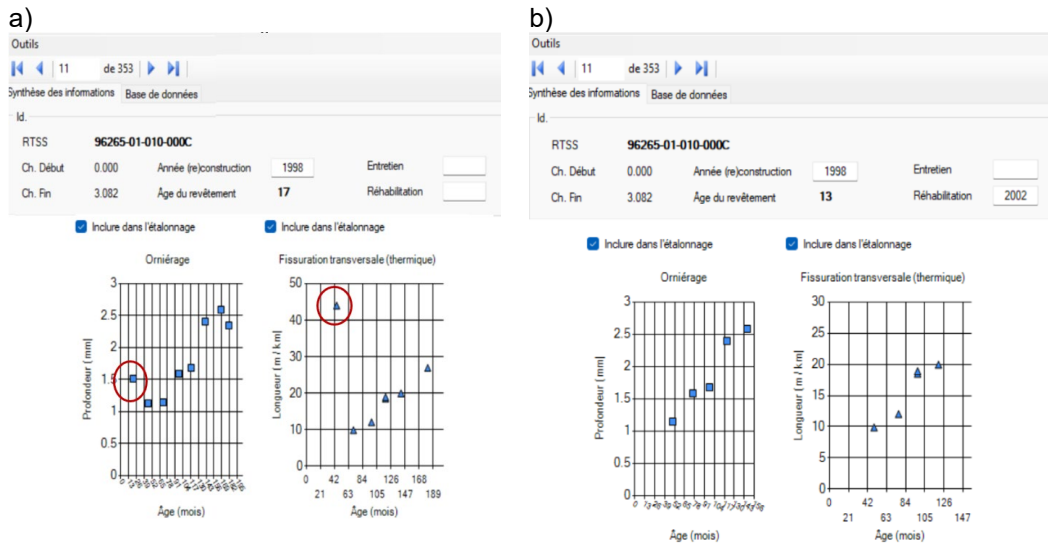


Figure 23 : Ajustement de l’allure de la courbe suite à un point aberrant se présentant au début de la variation de l’orniéage et de la fissuration transversale au cours du temps (Projet 11). (a) avant ajustement, (b) après ajustement

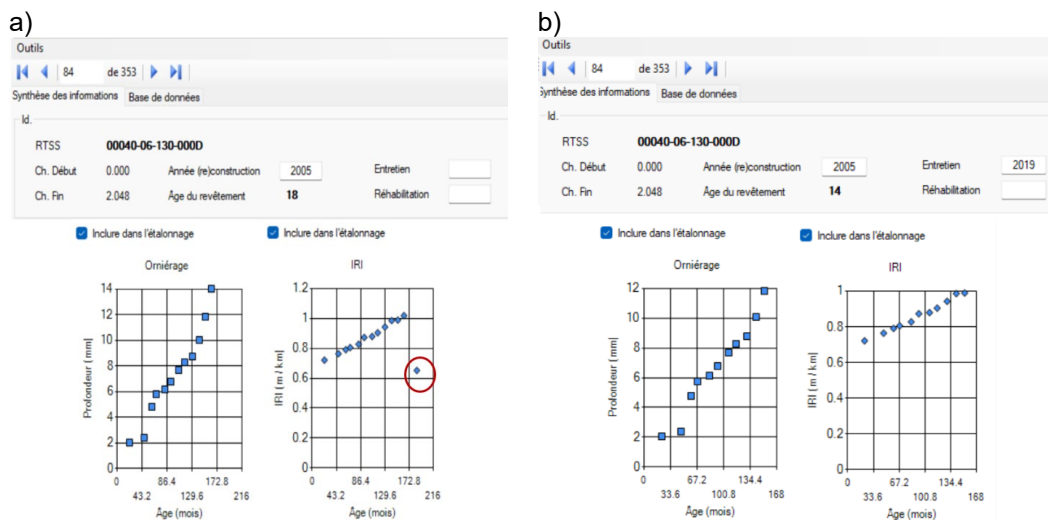


Figure 24 : Ajustement de l’allure de la courbe suite à un point aberrant se présentant à la fin de la variation de l’IRI au cours du temps (Projet 84). (a) avant ajustement, (b) après ajustement

5.4 Statistiques sur les sections retenues pour l’étalonnage

Différentes sections ont été considérées comme étant admissibles pour être utilisées dans le processus d’étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED. Ces sections répondent aux conditions de structure et de géométrie définies pour couvrir adéquatement les conditions attendues dans la province de Québec.

Le Tableau 13 fournit des statistiques supplémentaires sur les projets sélectionnés pour l’étalonnage local en termes du type du trafic et des zones climatiques. Les inspections ont été faites en s’appuyant sur les résultats du logiciel développé par l’équipe de recherche. Pour les quatre types de dégradation, l’enquête révèle que la large majorité des sections définit un trafic

de classe faible et couvre la zone climatique 2. Le Tableau 14 et le Tableau 15 résument le nombre de sections par types de dommages et par zones climatiques (voir la Figure 12), respectivement.

Tableau 13 : Statistiques sur les projets sélectionnés en termes de trafic et des zones climatiques

Nombre de projets par type de dégradation	Trafic			Zones climatiques			
	Faible	Moyen	Élevé	1	2	3	4
FC	75	24	9	11	53	36	8
O	146	35	15	25	101	44	26
FT	53	18	9	9	40	25	6
IRI	141	32	10	22	94	45	22

Tableau 14 : Nombre de sections par classe fonctionnelle et par indicateur de performance

Classe fonctionnelle	Fissuration			
	En piste de roues	Transversale	Orniérage	IRI
10 - Autoroute	32	24	80	76
20 - Nationale	49	39	77	70
30 - Régionale	27	17	39	37
Total	108	80	196	183

Tableau 15 : Nombre de sections par classe fonctionnelle et par zone climatique

Classe fonctionnelle	Zone climatique			
	1	2	3	4
10 - Autoroute	18	40	23	4
20 - Nationale	7	40	14	22
30 - Régionale	5	25	10	2
Total	30	105	47	28

Le système « GCH-6011 » utilise un indice de performance (IP) comme référence pour l'état de la chaussée. Ces valeurs vont de 0 à 100, 0 étant un état critique et 100 un état de chaussée neuve. En plus des indicateurs de performance conventionnels (fissuration globale, de fatigue et transversale, déformation et IRI), le « GCH-6011 » utilise un indicateur de la gélivité de la chaussée. Il s'agit de comparer l'IRI hivernal à l'IRI estival (Δ IRI) mesurés sur une même portion de route. Le différentiel entre les données estivales et hivernales peut indiquer des problèmes reliés au gel. La Figure 25 montre la gamme des valeurs de IP dans les sections sélectionnées pour l'étalonnage.

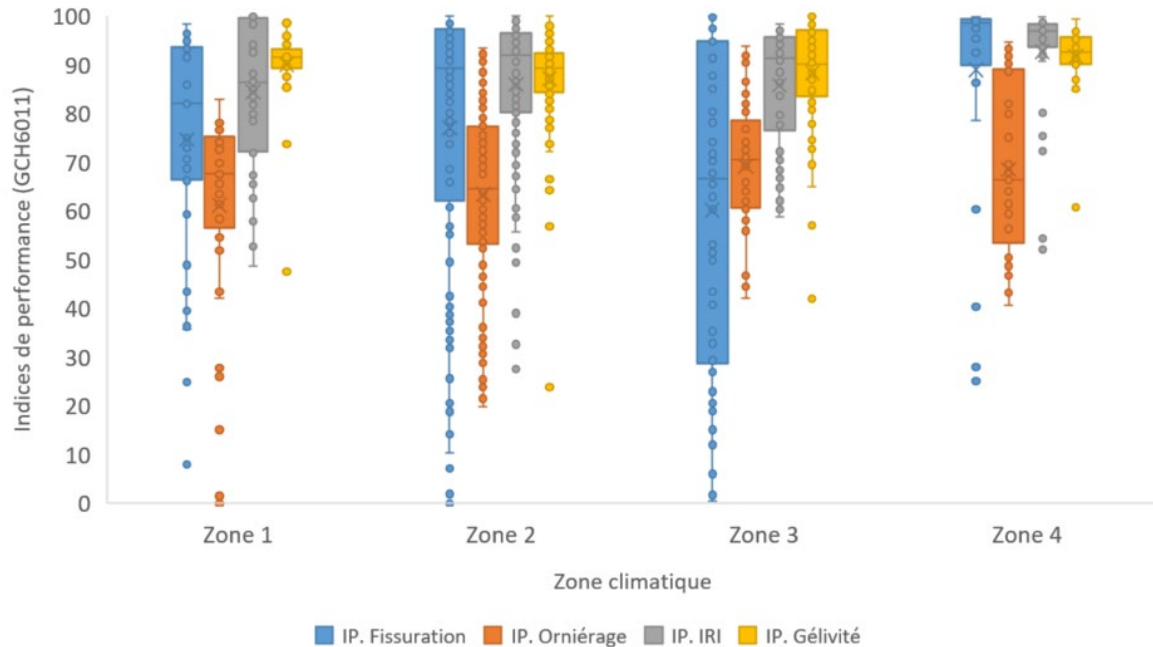


Figure 25 : Indices de performance (IP) dans les différentes zones climatiques

Deux variables n'ont pas été considérées comme discriminantes lors de l'échantillonnage : le trafic et les matériaux présents dans la structure de la chaussée (à l'exception des matériaux d'isolation ou d'un géotextile). Les plages et les valeurs de ces variables seront, à des fins pratiques, considérées comme aussi représentatives que les sections de référence choisies.

5.4.1 Fréquence des matériaux dans les sections de référence

Différents matériaux composent les structures de chaussée des sections de référence. Les tableaux 16, 17 et 18 montrent la fréquence des matériaux dans les différentes couches de la chaussée. D'après la fréquence des matériaux dans la base de données, les matériaux MG-20, MG-112 et ESG-10 sont les plus présents dans les sections, tandis qu'il y a aussi des matériaux recyclés (MR), et d'autres matériaux spéciaux (enrobé expérimental et décohesionné).

Tableau 16 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (enrobé bitumineux)

Matériaux	Fréquence	
	f	%
145-ESG-10	180	25,2%
121-GB-20	128	18,0%
147-ESG-14	108	15,1%
120-EB-20	106	14,9%
143-ESG-5	54	7,6%
110-EB-10S	43	6,0%
114-EB-14	37	5,2%
131-EG-10	25	3,5%
112-EC-10	11	1,5%
071-MB-12,5	7	1,0%
074-MB-20	7	1,0%
111-EB-10C	1	0,1%
155-Enrobé expérimental	5	0,7%

Tableau 17 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (fondation)

Matériaux	Fréquence	
	f	%
510-MG-20	261	72.7%
520-MG-56	88	24.5%
550-MR, type 1	8	2.2%
565-MR, type 4	2	0.6%

Tableau 18 : Matériaux et fréquence observée dans la base de données (sous-fondation)

Matériaux	Fréquence	
	f	%
730-MG-112	192	79.7%
720-MG-56	22	9.1%
700-Sable (autre que SP)	7	2.9%
916-Remblai de pierre	6	2.5%
400-Pierres concassées	5	2.1%
820-MR, type 5	3	1.2%
705-Sable (SP)	2	0.8%
320-Décohésion. (gravier+GBC)	2	0.8%
805-MR, type 2	1	0.4%
500-Gravier existant	1	0.4%

5.5 Importation

À l'issue de l'échantillonnage initial, les sections de référence pour chaque type de dégradation ont été importées dans l'outil Calibration Tool Assistant (CAT) via un fichier au format .csv. Cette base de données a pour objectif de refléter au mieux les conditions du réseau routier québécois en termes de zone climatique, niveau de trafic, matériaux et types de routes. Quatre projets ont ainsi été créés dans le CAT pour couvrir l'ensemble des types d'endommagement. Une fois les données mesurées et prédites intégrées dans le CAT, une inspection complémentaire a été effectuée afin d'identifier d'éventuelles valeurs aberrantes dans les performances (AASHTO, 2020). Les données, présentées sous forme de séries chronologiques pour la fissuration sous charge, l'orniérage, la fissuration transversale et l'IRI, n'ont révélé aucun point isolé à exclure. Toutefois, les points de mesure nuls ont été retirés du processus d'optimisation. L'échantillon final retenu comprend 108, 196, 80 et 183 sections de référence, respectivement pour la fissuration sous charge, l'orniérage, la fissuration transversale et l'IRI.

6. NIVEAU DE PRÉCISION DES DONNÉES D'ENTRÉE

Pour le processus d'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED, il est nécessaire de définir les niveaux de précision des variables d'entrée. Cette définition aide à réaliser l'étalonnage de manière plus cohérente et permet d'identifier efficacement les éventuelles erreurs lors de l'étalonnage. Les données d'entrée peuvent être très complexes et la précision et la hiérarchie des différentes variables d'entrée devraient émuler au mieux la pratique habituelle de conception et d'analyse des chaussées du ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD).

Ce chapitre vise à présenter le niveau de hiérarchie des variables d'entrée à utiliser pour l'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED. Les informations présentées dans ce document suivent les recommandations et les descriptions données dans les guides « Mechanistic-empirical pavement design guide : A manual of practice » (AASHTO, 2020a) et « Guide for the local calibration of the mechanistic-empirical pavement design guide » (AASHTO, 2010).

6.1 Contexte

En raison de la complexité qui peut être atteinte lors de la caractérisation des variables d'entrée dans l'approche M-E, une analyse de leur précision doit être effectuée sur la base des informations disponibles et de l'applicabilité pratique. Il existe trois niveaux de hiérarchie pour les variables d'entrée dans le logiciel AASHTOWare Pavement ME Design (voir section 2.1.3). La sélection du niveau de complexité à utiliser pendant le processus d'étalonnage est basée sur : (1) les informations disponibles, et (2) les pratiques courantes de conception des chaussées. Les informations sur les variables d'entrée pertinentes sont examinées dans les sections suivantes.

6.2 Matériaux de chaussée

Dans le cas des matériaux de chaussée, les valeurs fixes et de référence seront associées aux caractéristiques des matériaux utilisés sur le réseau routier du MTMD, en considérant uniquement les enrobés bitumineux, les matériaux granulaires et les sols. Si les matériaux ne sont pas répertoriés dans les tableaux 16, 17 et 18, les valeurs utilisées sont celles de matériaux analogues les plus pertinents. Pour cette analyse, seuls les matériaux présentés dans les sections de référence à utiliser dans le processus d'étalonnage sont considérés (voir tableaux 16, 17 et 18).

6.2.1 Enrobé bitumineux (EB)

La classification des enrobés bitumineux dans les différentes sections de référence correspond à des spécifications qui ont évolué dans le temps. Le Tableau 19 résume le changement de nomenclature des enrobés bitumineux au cours des différentes années dans la province de Québec, et le Tableau 20 présente les enrobés associés à ces classifications et leur représentativité dans les sections de référence.

Tableau 19 : Évolution des enrobés au Québec (Paradis, 2015)

	1994-1997	1997-2007	2008-
Couche de base	MB16 et MB20	EB-20 et GB-20	GB-20
Couche de surface	MB12.5	EB-10S, ESG-10 et EG-10	ESG-10 et EG-10
Couche unique	MB16	EB-14 et ESG-14	ESG-14
Couche de correction	MB10	EB-10C et EC-10	EC-10
Intervention palliative	-	EB-10C et EC-10	EGM-10

Tableau 20 : Proportion de types d'EB dans les sections de référence par rapport à la spécification

	1994-1997	1997-2007	2008-
Type d'EB (par priorité décroissante)	071-MB-12.5 074-MB-20	120-EB-20 110-EB-10S 114-EB-14 111-EB-10C	145-ESG-10 121-GB-20 147-ESG-14 143-ESG-5 131-EG-10 112-EC-10
Proportion	2,0 %	26,4 %	71,6 %

Comme il est possible de constater, la plupart des EB dans les sections de référence sont ceux définis par les spécifications utilisées depuis 2008 (norme 4202 (MTMD, 2008)). Ces types de EB ont été optimisés et disposent d'une caractérisation de leurs propriétés mécaniques, paramètres nécessaires pour appliquer les principes M-E au niveau 1 et niveau 2 (paramètres locaux). D'autre part, 28,4% des sections ont des EB basés sur des spécifications différentes (norme 4201 ou antérieure (MTMD, 1995)), donc pour leurs caractéristiques mécaniques une analyse de niveau 3 (paramètres par défaut) sera utilisée.

6.2.1.1 Module dynamique

L'un des paramètres conditionnant la réponse mécanique de l'EB est le module dynamique. Le logiciel AASHTOWare PMED utilise le modèle de Witczak pour modéliser l'influence de la température et de la fréquence sur le module dynamique. Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \cdot \log(f_r))}} \quad (44)$$

Où,

$|E^*|$ est le module dynamique (MPa).

$\delta, \alpha, \beta, \gamma$ sont des coefficients de régression.

f_r est la fréquence réduite (Hz). Étant f_r décrit par :

$$f_r = a_T \cdot f \rightarrow \log(f_r) = \log(f) + \log(a_T) \quad (45)$$

Où,

f est la fréquence (Hz).

a_T est un facteur de translation (Hz) décrit par (Doucet & Auger, 2012) :

$$\log(a_T) = a_1 \cdot (T - T_r) + a_2 \cdot (T - T_r)^2 \quad (46)$$

Où,

a_1, a_2 sont des coefficients de régression.

T est la température (°C).

T_r est la température de référence (10 °C).

Le Tableau 22 présente un résumé des statistiques descriptives associées au module dynamique des enrobés bitumineux de la province de Québec présentées par Doucet (2014). Ce tableau fournit une référence pour l'ordre de grandeur attendu des modules dynamiques associés à la taille maximale nominale ou au type de bitume utilisé.

Tableau 21 : Module dynamique des enrobés (Doucet, 2014)

	Enrobé	Module dynamique ^a (MPa)					
		Teneur en bitume	Teneur en vides	Moyenne	Écart-type	CV	n
Grosueur nominale maximale	10 mm	5,3%	3,7%	7500	1540	21%	51
	14 mm	4,8%	4,1%	9390	1820	19%	7
	20 mm	4,4%	4,0%	9300	1930	21%	10
Type de bitume	PG 58-28	5,1%	4,3%	10470	1660	16%	4
	PG 58-34	5,0%	3,3%	7390	1520	21%	23
	PG 64-28	4,7%	4,2%	10420	880	17%	5
	PG 64-34	5,3%	3,9%	7300	1270	6%	31
	PG 70-28	5,0%	4,0%	10240	660		5

^a Module dynamique à 10 °C et 10 Hz

Le Tableau 23 regroupe les coefficients de régression du modèle de Witczak pour les enrobés bitumineux typiques utilisés au MTMD (Doucet & Auger, 2012). Les paramètres typiques seront utilisés pour recalculer les valeurs en fréquence et en température telles qu'elles seront déclarées dans le logiciel. Cette approche est de niveau 2. Cependant, aux fins de l'utilisation du logiciel, le niveau 1 sera sélectionné dans le logiciel AASHTOWare PMED et les valeurs résultant de l'application de l'équation 44 avec les paramètres du Tableau 22 seront utilisées, pour la fréquence et température demandée par le logiciel.

Tableau 22 : Coefficients de régression du modèle de Witczak au Québec (Doucet & Auger, 2012)

Enrobé	Bitume	Coefficients de régression. $\log |E^*|$ (MPa)					
		δ	α	β	γ	a_1	a_2 (10^{-4})
ESG-10	PG 58-28	-0,480	5,011	-1,718	-0,412	-0,150	6,28
	PG 58-34	-0,051	4,548	-1,325	-0,386	-0,144	7,20
	PG 64-28	-0,083	4,627	-1,615	-0,321	-0,151	6,74
	PG 64-34	0,539	3,953	-1,323	-0,377	-0,148	7,34
	PG 70-28	-0,693	5,238	-1,829	-0,265	-0,160	6,11
ESG-14	PG 58-28	-0,330	4,877	-1,766	-0,430	-0,149	6,72
	PG 58-34	0,399	4,092	-1,295	-0,399	-0,148	8,23
	PG 64-28	-0,177	4,756	-1,748	-0,313	-0,152	6,68
	PG 64-34	0,480	4,056	-1,517	-0,350	-0,148	5,88
	PG 70-28	0,496	4,038	-1,652	-0,304	-0,157	6,49
GB-20	PG 58-28	-0,309	4,870	-1,781	-0,435	-0,149	6,36
	PG 58-34	0,266	4,252	-1,345	-0,405	-0,145	8,23
	PG 64-28	0,130	4,421	-1,678	-0,346	-0,150	7,14
	PG 64-34	1,035	3,502	-1,284	-0,400	-0,145	6,73
	PG 70-28	-0,932	5,497	-1,888	-0,279	-0,157	5,34

6.2.1.2 Propriétés physiques et volumétriques

Certaines propriétés physiques et volumétriques de l'EB sont nécessaires pour la conception des chaussées avec le logiciel AASHTOWare PMED. Le Tableau 23 montre les paramètres à utiliser pour les différents enrobés bitumineux pendant la phase de conception de la chaussée. Afin de rendre les valeurs granulométriques présentées cohérentes avec les exigences du logiciel AASHTOWare PMED, les tableaux suivants utiliseront les ouvertures de tamis définies dans le logiciel, même si elles sont différentes de celles utilisées par le MTMD. En ce qui concerne le bitume, les valeurs de module de cisaillement G^* pour différentes classes du bitume sont présentées au Tableau 24. Celles-ci ont été obtenues du MTMD et sont représentatives des bitumes typiquement utilisés au Québec.

Tableau 23 : Propriétés typiques des enrobés bitumineux au Québec

Enrobé bitumineux (EB)		GB-20	ESG-14	ESG-10	EG-10
Propriétés volumétriques					
Masse volumique (kg/m ³) ^a		2390	2360	2350	2370
Volume de bitume effectif (%)		10,2	11,4	12,2	12,4
Teneur en vides (%) ^b		7,0	7,0	7,0	7,0
Coefficient de Poisson		0,35	0,35	0,35	0,35
Granulométrie (% passant)	19 mm (20 mm)	98 %	100 %	100 %	100 %
	9,5 mm (10 mm)	64 %	80 %	96 %	95 %
	4,75 mm (5 mm)	42 %	50 %	58 %	46 %
	75 µm (80 µm)	4,9 %	5,3 %	5,7 %	5,6 %
Propriétés mécaniques					
Module dynamique de l'enrobé		Niveau 1 (Tableau 22)			
Module de cisaillement du bitume G^*		Niveau 1 (Tableau 24)			
Température de référence		10 °C			
Grade de bitume (PG)		Spécifique au projet			
Résistance à la traction indirecte (MPa)		Niveau 3			
Comportement en fluage (1/GPa)		Niveau 3			
Propriétés thermiques					
Conductivité thermique, (watt/mètre-Kelvin)		1,48			
Capacité thermique (joule/kg-Kelvin)		870			
Contraction thermique		Niveau 3			

^a Basé sur une teneur en vides d'air de 7 %.

^b Teneur en vides maximum, mais généralement inférieur.

Tableau 24 : Valeurs de module de cisaillement du bitume

Température (°C)	PG 58H-34		PG 58E-34		PG 64E-28	
	G^* (kPa)	δ	G^* (kPa)	δ	G^* (kPa)	δ
4,44	4174,10	63,15	4148,49	61,80	7907,90	62,55
12,78	1362,99	64,58	1249,86	61,13	2767,13	63,60
21,11	398,08	65,73	483,80	62,93	912,78	64,20
29,44	112,73	66,68	155,99	62,77	282,21	63,80
37,78	34,21	67,13	52,01	61,87	86,34	62,30
46,11	11,71	67,45	19,30	60,70	29,71	60,30
54,44	4,49	68,38	8,10	60,00	12,09	58,95

6.2.2 Matériaux granulaires non liés et matériaux recyclés

Les matériaux granulaires présentent un comportement non linéaire dans le domaine élastique. Le modèle constitutif général recommandé dans la pratique actuelle pour le module réversible est le modèle d'Uzan (NCHRP, 2004) :

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (47)$$

Où,

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (48)$$

Et,

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (49)$$

Où,

M_r est le module réversible.

I_1 la contrainte totale.

τ_{oct} la contrainte de cisaillement octaédrique.

p_a la pression de référence (100 kPa).

k_1 , k_2 et k_3 sont des constantes déterminées expérimentalement.

σ_1 , σ_2 et σ_3 sont les contraintes principales ($\sigma_2 = \sigma_3$).

La non-linéarité (équation 47) n'est pas implémentée dans le logiciel AASHTOWare PMED, ainsi les valeurs de M_r pour les matériaux de fondation et de sous-fondation seront choisis en fonction des états de contrainte de référence. À titre indicatif, un état de contrainte de $\sigma_3 = 35$ kPa et $q = (\sigma_1 - \sigma_3) = 70$ kPa pour la fondation et un état de contrainte de $\sigma_3 = 20$ kPa et $q = (\sigma_1 - \sigma_3) = 40$ kPa pour la sous-fondation sont proposés par Doucet (2014). L'état de contraintes réel varie notamment selon la charge appliquée, le type et l'épaisseur de revêtement ainsi que la rigidité du support. Le guide AASHTO (AASHTO 1993) suggère des états de contrainte totale (θ) variant entre 35 et 210 kPa pour la fondation et entre 35 et 70 kPa pour la sous-fondation.

Il faut considérer qu'à l'intérieur d'une même spécification de matériaux de fondation et de sous-fondation utilisée par le MTMD, des comportements différents peuvent être superposés. Ce phénomène a été documenté par Doucet (2014), dont les résultats sont résumés dans le Tableau 25. Dans le contexte de ce projet, les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour différencier les différents types de matériaux au sein d'une même spécification granulométrique. Compte tenu de ce qui précède, des caractéristiques relativement conservatrices seront privilégiées pour la caractérisation des matériaux. Le Tableau 26 présente les propriétés des matériaux de fondation et de sous-fondation des sections de référence.

Tableau 25 : Module réversible des matériaux granulaires selon le type de matériau granulaire et d'ajout (Doucet, 2014)

Matériau granulaire	Teneur en eau	Masse vol. (kg/m ³)	Module réversible ^a (MPa)			
			Moyenne	Écart-type	CV	n
Pierre concassée, PC	2,9%	2097	321	85	27%	20
Pierre concassée fine, PCM	2,8%	2164	254	47	19%	11
Gravier concassé, GC	3,7%	2053	218	57	26%	16
Sable, S	2,9%	1809	239	46	19%	7
Granulats bitumineux récupérés, GBR-PC	2,9%	2101	309	32	10%	3
Granulats bitumineux récupérés, GBR-GC	3,5%	2002	198	13	7%	5
Bardeaux d'asphalte	3,8%	2005	220	16	7%	2
Béton de ciment	5,8%	1819	324	37	11%	2

^a Module réversible à $\sigma_3 = 35$ kPa et $\sigma_d = 70$ kPa

Tableau 26 : Propriétés des matériaux granulaires (TAC, 2020)

Matériaux granulaires	Couche de fondation		Couche de sous-fondation		
	MG 20	MG 56	MG 112	MG 56	
Coefficient de Poisson	0,20	0,20	0,20	0,20	
Coeff. pression latérale (k_0)	0,50	0,50	0,50	0,50	
Module réversible (MPa)	Tableau 27		150	215	
$M_r = k_1 p_a \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$	$k_1 = 2,450$	$k_1 = 2,155$	$k_1 = 1,610$	$k_1 = 2,155$	
	$k_2 = 0,848$	$k_2 = 0,600$	$k_2 = 0,769$	$k_2 = 0,600$	
	$k_3 = -0,400$	$k_3 = 0,000$	$k_3 = -0,324$	$k_3 = 0,000$	
	25 mm	100%	72%	100%	60%
	19 mm	94%	66%	100%	55%
	14 mm	77%	60%	100%	48%
	10 mm	61%	55%	99%	42%
Granulométrie (% passant)					
5,0 mm	37%	43%	97%	33%	
1,25 mm	15%	24%	85%	17%	
75 μ m	4%	4%	5%	3%	
Limite de liquide (%)	20	20	20	20	
Indice de plasticité (%)	5	5	5	5	
Masse vol. sec max. (kg/m ³)	2220	2220	1790	2220	
Conductivité hydraulique (m/h)	Niveau 3		Niveau 3		
Courbe caractéristique sol-eau	Niveau 3		Niveau 3		
Densité des grains	2,72	2,65	2,64	2,65	
Teneur en eau optimale (%)	6,0	5,0	10,6	5,0	

Le Tableau 27 présente les modules des matériaux de fondation en fonction des épaisseurs des enrobés bitumineux (différents états de contrainte). L'annexe C détaille les critères de définition de ces paramètres.

Tableau 27 : Valeurs de module réversible (M_r) pour les matériaux de fondation

Matériau	$H_{AC} \leq 100$	$100 < H_{AC} < 150$	$150 < H_{AC} < 200$	$200 < H_{AC} < 250$	$250 \leq H_{AC}$
MG 20	425 MPa	300 MPa	200 MPa	150 MPa	135 MPa
MG 56	395 MPa	280 MPa	200 MPa	160 MPa	145 MPa

Moniz et al. (2013) fournissent des valeurs typiques pour les modules de différents matériaux recyclés, présentées dans le Tableau 28. Les paramètres à associer aux matériaux recyclés utilisés comme fondation ou sous-fondation sont présentés dans le Tableau 28 et le Tableau 29.

Tableau 28 : Modules réversibles et coefficients de Poisson réversibles des matériaux recyclés (Moniz et al., 2013)

Type de matériau recyclé	Masse vol. (kg/m ³)	Module réversible ^a (MPa) et coefficient de Poisson					
		Initial	μ	Saturé	μ	Drainé	μ
MR-2	1856	449	0,24	509	0,23	487	0,23
MR-3	1884	354	0,21	297	0,24	299	0,24
MR-4	2149	368	0,21	318	0,23	310	0,22
MR-5	1977	295	0,20	278	0,23	293	0,20
MR-5 ^b	2107	355	0,22	363	0,24	346	0,22
MR-6 ^b	2009	393	0,24	355	0,27	350	0,25

^a Module réversible à $\sigma_3 = 70$ kPa et $\sigma_d = 140$ kPa

^b MR-5 et MR-6 ont reçu un conditionnement de 30 000 cycles supplémentaires

Tableau 29 : Propriétés des matériaux recyclés (MR)

Matériaux granulaires	Couche de fondation		Couche de sous-fondation	
	MR-1	MR-4	MR-2	MR-5
Coefficient de Poisson	0,20	0,20	0,20	0,20
Coeff. pression latérale (k_0)	0,50	0,50	0,50	0,50
Module réversible (MPa)	300	250	215	150
$Mr = k_1 \theta^{k_2}$	$k_1 = 13,6$ $k_2 = 0,6$	$k_1 = 11,5$ $k_2 = 0,6$	$k_1 = 13,6$ $k_2 = 0,6$	$k_1 = 15,0$ $k_2 = 0,5$
25 mm	100%	100%	100%	100%
19 mm	96%	97%	98%	95%
14 mm	83%	87%	92%	80%
Granulométrie (% passant)				
10 mm	72%	75%	81%	66%
5,0 mm	43%	47%	52%	40%
1,25 mm	16%	22%	27%	15%
75 μ m	4%	4%	4%	4%
Limite de liquide (%)	20	20	20	20
Indice de plasticité (%)	5	5	5	5
Masse vol. sec max. (kg/m ³)	2200	2100	2050	2050
Conductivité hydraulique (m/h)	Niveau 3		Niveau 3	
Courbe caractéristique sol-eau	Niveau 3		Niveau 3	
Densité des grains	2,65	2,65	2,65	2,65
Teneur en eau optimale (%)	4,0	4,0	4,0	4,0

D'autres matériaux sont utilisés comme matériaux de fondation ou de sous-fondation. Dans ces cas, leurs caractéristiques seront considérées comme analogues à celles des matériaux décrits ci-dessus, les équivalences correspondantes sont indiquées au Tableau 30.

Tableau 30 : Équivalence entre matériaux utilisés comme fondations et sous-fondations

Matériaux	Fréquence	Matériaux équivalents
916-Remblai de pierre	0,50 %	
400-Pierres concassées	0,40 %	MG 20 - fondation
505-Gravier (GW)	0,20 %	
700-Sable (autre que SP)	0,50 %	
705-Sable (SP)	0,20 %	MG 112 - sous-fondation

6.2.3 Sols

Les caractéristiques des sols supports sont déterminées à partir de la carte interactive des dépôts superficiels du Système d'information géomining du Québec (SIGÉOM) (Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 1993) et les informations disponibles dans la base de données et les cartes de l'institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (<https://irda.qc.ca/fr/outils/donnees-pedologiques-sols/cartes-pedologiques-quebec-irda/>). Des informations relatives aux dépôts géologiques peuvent être extraites de ces bases de données, et il existe des informations partielles sur la granulométrie des matériaux (pourcentages de sable, de limons (silt) et d'argiles).

Afin de simplifier la classification des sols, et pour être cohérent avec les pratiques recommandées dans le logiciel, la méthode AASHTO de classification des sols est utilisée comme référence. Cela permet de minimiser le nombre de variables nécessaires à la classification du type de sol. Pour cela, les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

- La granulométrie est décrite comme suit :
 - Le pourcentage de sable sera associé au matériau retenu sur le tamis 80 micromètres, alors que le passant sera associé au pourcentage d'argile et de limon.
- Les indices de plasticité sont dérivés de la proportion de fines et de la minéralogie identifiée sur le site, dans les conditions suivantes :
 - Mixte sableux = limite liquide inférieure à 40%.
 - Mixte argileux = limite de liquide supérieure à 40%.
 - Plus de limon que d'argile = indice de plasticité supérieure à 10%
 - Plus d'argile que de limon = indice de plasticité inférieure à 10%.

Le Tableau 31 montre la référence générale pour la classification des sols utilisée. En plus du Tableau 31, les sections pour lesquelles les informations sont insuffisantes pour la classification ont été désignées avec la classification connue la plus proche de leur position géographique. Les sols déterminés pour chaque section de référence sont présentés dans le fichier : "Correspondance entre le dépôt et le sol.xlsx " joint à ce document (Annexe D).

Tableau 31. Classification des sols pour l'étalonnage AASHTOware PMED

Quantité de fines (limons + argiles)	Rapport argile - limon	Minéralogie	Classification AASHTO (Groupe / Sous-groupe)	Description
Moins de 35 % de fines	Plus de limon que d'argile	Mixte sableux	A-2-4	Sables et graviers à haute teneur en fines
		Mixte argileux	A-2-5	Sables et graviers à haute teneur en fines
	Plus d'argile que de limon	Mixte sableux	A-2-6	Sables et graviers à haute teneur en argile
		Mixte argileux	A-2-7	Sables et graviers à haut indice de plasticité
Plus de 35% de fines	Plus de limon que d'argile	Mixte sableux	A-4	Sols de limon sableux
		Mixte argileux	A-5	Sols de limon sableux
	Plus d'argile que de limon	Mixte sableux	A-6	Argile à compression faible à moyenne
		Mixte argileux	A-7	Argile à haute compression

6.2.3.1 Sensibilité au type de sol

Selon la méthodologie utilisée et les données disponibles, le type de sol est une donnée associée aux matériaux du système de chaussée pour lequel il y a le plus d'incertitudes. Une méthode a donc été proposée pour classer le sol de manière « synthétique ». Cette analyse permet de documenter à quel point les résultats de la prédiction de la performance de la chaussée sont affectés en utilisant la méthode proposée. Pour évaluer l'effet du type de sol sur la prédiction de la performance effectuée par le logiciel AASHTOWare PMED, une structure typique a été évaluée dans les mêmes conditions climatiques, en changeant uniquement le type de sol. Les conditions de trafic ont été maintenues au niveau 3 (Tableau 32). Le climat de la ville de Québec a été utilisé dans les simulations et les propriétés des matériaux sont résumées dans le Tableau 33. La sensibilité de la prédiction de la performance au changement du type de sol est montrée dans la Figure 26.

Tableau 32 : Caractéristiques du trafic utilisé dans l'analyse de sensibilité

Variables	Valeur
Débit journalier moyen annuel dans deux directions	4000
Nombre de voies	2
Camions dans le sens de la conception	50 %
Camions en voie de conception	95 %
Vitesse	100 km/h

Tableau 33 : Structure de chaussée de référence

Couche	Épaisseur (mm)	Module (MPa)	Propriétés
ESG-10	70	Tableau 22	Tableau 23
MG20 (fondation)	250	425	Tableau 26
MG112 (sous- fondation)	600	150	Tableau 26

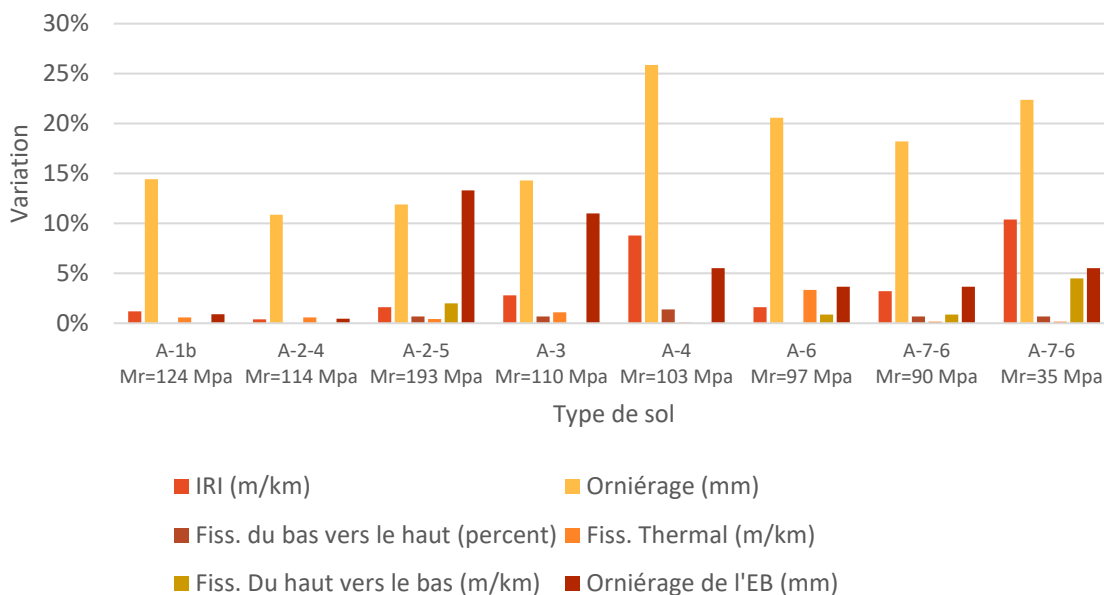


Figure 26 : Variation de la prédiction de performance par rapport au sol A-1a (Mr=124 MPa)

Selon l'analyse de sensibilité de la structure évaluée, en utilisant comme référence un sol A-1a, il est possible de déduire que le paramètre le plus sensible au type de sol est l'orniérage, dont la prédiction peut varier jusqu'à 25% en considérant différents types de sol. Il est également observé qu'il y a des variations même dans des sols avec des valeurs Mr similaires (par exemple A-1a et A-1b), ce qui indique que les propriétés des matériaux affecteront les prédictions de manière significative.

6.3 Trafic

Le MTMD maintient un inventaire de circulation sur l'ensemble de son réseau routier. Ces données sont accessibles via le système d'information sur la circulation routière « CIR-6002 ». On y retrouve un historique des débits journaliers moyens annuels (DJMA) de toutes les routes sous la juridiction du MTMD ainsi que tous les autres comptages spécifiques tels que notamment les pourcentages de camion, les classifications par longueurs de camions (5 classes), et les classifications de camions selon le standard FHWA (13 classes).

L'inventaire du système « CIR-6002 » contient un très grand nombre de classifications par longueur et un nombre beaucoup plus limité de classifications FHWA. Les tentatives pour estimer la classification FHWA à partir des classifications par longueur sont insatisfaisantes, avec des erreurs relatives allant de 60% à plus de 300% (Houimli et al., 2017). Dans ce contexte, les classifications par longueur sont considérées inutilisables pour l'analyse et le dimensionnement M-E des chaussées. Les données des stations de pesage en marche (WIM) sont archivées séparément, à l'extérieur du système CIR-6002. Les stations WIM existent en nombre très limité. Le MTMD utilise un tableau de coefficients d'agressivité par défaut (en fonction de la classe de route et du pourcentage de camions) pour représenter l'agressivité des camions en l'absence de données spécifiques.

Les informations sur le débit journalier moyen annuel (DJMA) et le pourcentage de camions sont disponibles pour chaque section de référence. L'historique est aussi disponible pour la détermination des taux d'accroissement annuel. Le Tableau 34 résume le niveau de hiérarchie à utiliser pour les caractéristiques du trafic lors des étalonnages.

Tableau 34 : Niveau hiérarchique pour les variables de trafic

Paramètre	Précision
Volume des camions	Niveau 1 ^a
Vitesse (km/h)	Niveau 1 ^b
Pression des pneus	Niveau 3
Configuration des essieux	Niveau 3
Déplacement latéral	Niveau 3
Empattement	Niveau 3

^a DJMA et % de camions obtenus au système « GCH-6011 »

^b La vitesse maximale disponible au système « GCH-6011 » est considérée comme la vitesse de référence

La Figure 27 montre les valeurs de DJMA des sections de référence pour différentes classes fonctionnelles de route et zones climatiques. Il est constaté que les valeurs DJMA les plus élevées se trouvent dans la zone 1. Toutes les zones climatiques ont des valeurs de DJMA comprises entre 1000 et 8000.

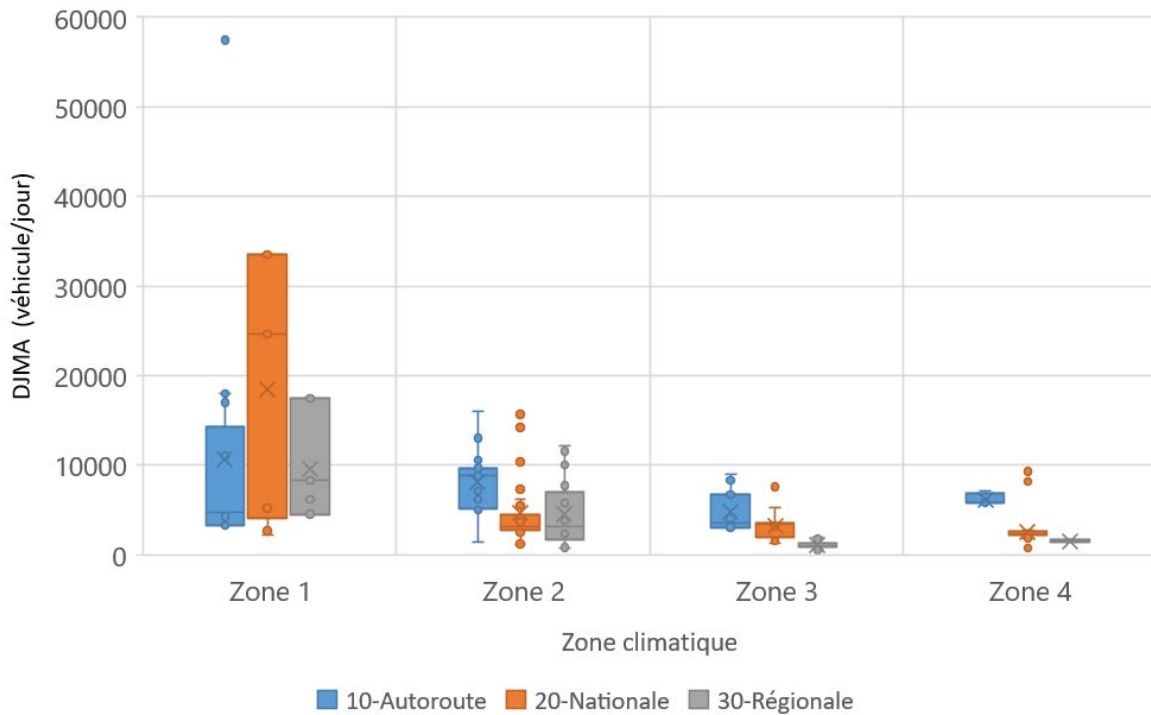


Figure 27 : DJMA dans les sections de référence

Houimli et al. (2017) ont réalisé une caractérisation du trafic dans la province de Québec, dans le but d'être utilisée dans l'application du MEPDG. L'étude s'est basée sur des mesures effectuées dans 16 stations WIM, dont 12 étaient situées sur des autoroutes et 4 sur des routes nationales. Les sections suivantes résument les conclusions tirées par Paquet (2009), Martineau (2012) et Houimli et al. (2017).

6.3.1 Distribution et croissance des classes de véhicules

Les distributions annuelles et mensuelles des classes de camions sont des caractéristiques importantes pour la conception des chaussées. Ces variables doivent être caractérisées de manière adéquate en termes de classes de véhicules définies par la FHWA (NCHRP, 2004) pour être utilisées dans le logiciel AASHTOWare PMED. Au MTMD, plusieurs efforts ont été faits pour caractériser le trafic sur le réseau routier provincial en utilisant l'approche MEPDG (Houimli et al., 2017; Martineau, 2012; Paquet, 2009).

Dans ce projet, le niveau 1 sera utilisé pour la distribution et le taux de croissance par classe de véhicules. Pour cela, on utilisera les informations disponibles dans le système « CIR-6002 ».

6.3.1.1 Ajustements mensuels

Les paramètres mensuels représentent le pourcentage de chaque classe de véhicules (à partir de la classe 4) pour chaque mois. Dans le logiciel AASHTOWare PMED, les paramètres par défaut ont une valeur de 1, ce qui signifie que le pourcentage de véhicules est constant tout au

long de l'année. Cela ne reflète pas la réalité du réseau routier de la province de Québec. Le Tableau 35 présente les valeurs de distribution mensuelle du trafic dans la province de Québec déterminées par Houimli et al. (2017).

Tableau 35 : Tableau des ajustements mensuels (Houimli et al., 2017)

Mois	Classe de véhicule (FHWA)									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Janvier	0,767	1,304	0,674	0,662	0,383	0,786	0,596	0,843	0,850	0,723
Février	0,927	0,774	0,824	0,792	0,663	0,936	0,976	0,913	0,780	0,763
Mars	0,917	0,834	0,924	2,502	0,773	1,006	1,016	0,973	0,750	0,883
Avril	1,007	0,854	0,894	0,562	0,833	1,006	1,116	0,933	0,760	1,003
Mai	1,177	0,674	1,104	0,842	0,763	1,056	1,116	1,113	1,320	1,203
Juin	1,077	0,794	1,104	0,902	0,863	1,006	1,166	0,973	1,100	1,003
Juillet	1,007	1,024	1,174	0,952	1,133	1,006	1,076	1,213	1,300	1,133
Août	0,957	1,324	1,044	0,902	1,773	0,956	1,016	1,153	0,700	0,873
Septembre	1,047	1,324	1,254	1,072	1,623	1,086	1,116	1,013	0,930	1,103
Octobre	1,167	1,174	1,204	1,302	1,413	1,146	1,016	1,013	1,300	1,273
Novembre	0,917	1,034	0,924	0,802	1,003	1,006	0,956	0,923	1,140	1,133
Décembre	1,033	0,886	0,876	0,708	0,777	1,004	0,834	0,937	1,070	0,907

6.3.1.2 Distribution des groupes d'essieux pour chaque classe de camions

Houimli et al. (2017) ont calculé la distribution des groupes d'essieux pour les classes 4 à 13 pour la province de Québec à partir des données des stations WIM de 2012 à 2015. Le nombre de chaque type d'essieux ou de groupes d'essieux par classe de camions est déterminé en divisant le nombre total d'un type d'essieu spécifique mesuré pour une classe de camions par le nombre total de camions de cette classe. Les groupes d'essieux sont simples, tandem, tridem et quadridem. Le Tableau 36 illustre ces distributions.

Tableau 36 : Distribution des groupes d'essieux pour chaque classe de camions (Houimli et al., 2017)

Classe	Simple	Tandem	Tridem	Quadridem
4	1,65	0,43	-	-
5	2,00	-	-	-
6	1,04	1,03	-	-
7	1,10	0,96	0,19	0,10
8	1,74	1,13	-	-
9	1,23	2,02	-	-
10	1,27	1,00	0,99	-
11	4,90	0,21	0,16	-
12	1,20	1,08	1,02	-
13	1,63	1,64	1,01	0,01

Les informations présentées dans le Tableau 35 et le Tableau 36 seront utilisées pour tous les types de routes (autoroutes, nationales et régionales) au cours du processus d'étalonnage. Même s'il n'y a pas eu d'échantillonnage des routes régionales dans leur détermination, il est jugé que ces facteurs peuvent être considérés comme mieux ajustés et représentatifs des conditions du Québec que ceux donnés par défaut dans le logiciel AASHTOWare PMED.

6.3.1.3 Diagrammes de masses par essieux

Le logiciel AASHTOWare utilise des diagrammes de masses par groupes d'essieux (Axle load spectra) plutôt que les notions de charge équivalente (ECAS) et de coefficient d'agressivité (CA). Une série de diagrammes de masses ont été déterminés lors des études de Paquet (2009) Martineau (2012) et plusieurs diagrammes par défaut sont proposés par le logiciel AASHTOWare PMED. La Figure 28 montre la localisation des stations WIM avec des diagrammes de masse connus. De même, le Tableau 37 présente les caractéristiques de ces stations.

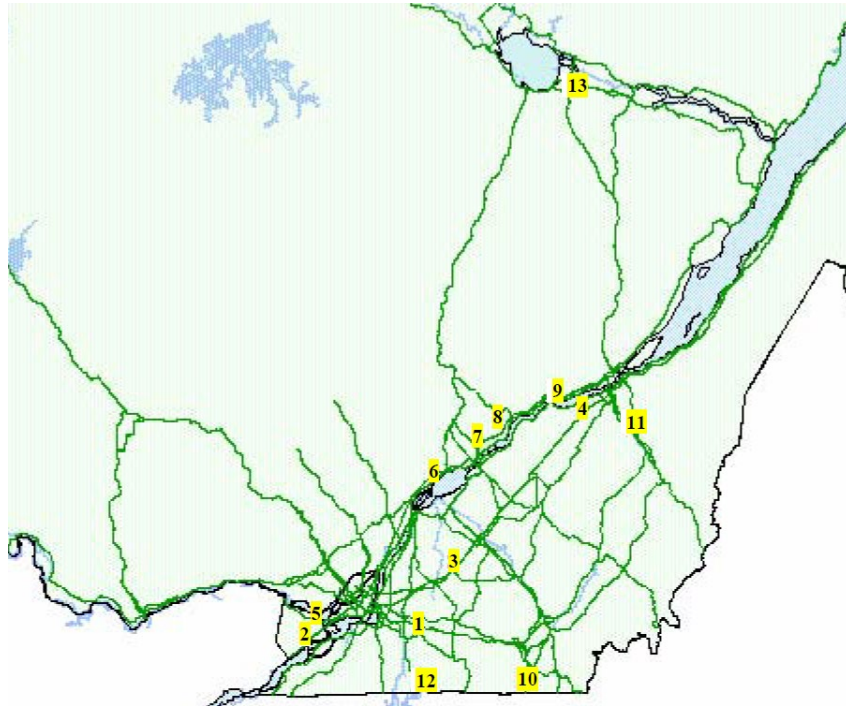


Figure 28 : Stations WIM avec diagrammes de masse connus (Martineau, 2012; Paquet, 2009)

Tableau 37 : Informations sur les stations WIM

Id.	Municipalité	Section Trafic	RTSS	Véhicules lourds
1	Ange-Gardien	1015500	00010-02-040	12,9 %
2	Les Cèdres	2002500	00020-01-053	23,7 %
3	Sainte-Hélène-de-Bagot	2039000	00020-04-160	28,4 %
4	Saint-Nicolas	2050000	00020-06-020	20,9 %
5	St-Lazare (Vaud-Dor.)	4002500	00040-01-040	10,6 %
6	Yamachice	4031000	00040-05-054	15,4 %
7	Champlain	4039000	00040-06-080	19,6 %
8	Batiscan	4040000	00040-06-120	18,0 %
9	Donnacona	4048000	00040-07-100	12,5 %
10	Rock Island	5502500	00055-01-051	26,7 %
11	Scott	7333000	00073-02-021	15,4 %
12	Philipsburg	13301000	00133-01-010	20,3 %
13	Jonquière	17048500	00170-01-334	8,5 %

L'approche retenue pour la poursuite du projet consiste à utiliser les spectres de charge provenant des stations WIM dont les coefficients d'agressivité moyens (CAM) sont comparables à ceux employés par le MTMD pour chaque classe de route lorsque les données de classification sont absentes, comme le résume le Tableau 38.

Tableau 38 : Valeurs CAM par défaut en l'absence de données de classification des véhicules (St-Laurent, 2006b, 2006a)

Classe de route	Pourcentage de véhicules lourds			
	0 % – 10 %	10 % – 20 %	20 % – 30 %	> 30 %
30-Régionale	1,4	2,7	-	-
20-National				
Urbaine	1,2	1,3	-	-
Rurale	2,1	3,1	3,7	5,3
10-Autoroute				
Urbaine	1,1	1,3	-	-
Péri-urbaine	1,7	2,0	-	-
Rurale	2,1	2,7	3,4	-

Pour identifier les spectres de charge analogues aux CAM présentés dans le Tableau 38, les données de 61 stations WIM ont été traitées afin de calculer le coefficient d'agressivité (CA) de chaque véhicule. Les résultats ont ensuite été agrégés par station pour déterminer un coefficient d'agressivité moyen (CAM) à l'aide d'une moyenne pondérée. Selon la catégorie de route, les stations présentant des CAM représentatifs ont été retenues. La sélection finale des stations WIM utilisées pour chaque condition a été effectuée par le MTMD. Le Tableau 39 présente les stations WIM retenues pour chaque classe de route et chaque proportion de véhicules lourds.

Les spectres de charge du Tableau 39 ont été importés dans AASHTOWare Pavement ME Design (PMED) afin de générer les fichiers XML correspondants. Ces fichiers ont ensuite été utilisés pour l'étalonnage des lois d'endommagement.

Tableau 39 : Sélection de la station WIM et du CAM correspondant par classe de route et pourcentage de véhicules lourds

Catégories de routes	Pourcentage de véhicules lourds			
	0 % – 10 %	10 % – 20 %	20 % – 30 %	> 30 %
30-Régionale				
	Jonqu06 CAM=0,65	Sta10 CAM=2,48	-	-
20-National				
Urbaine	Jonqu06 CAM=0,65	Jonqu06 CAM=0,65	-	-
Rurale	Bec10 CAM=1,49	Lau911 CAM=1,16	Phi10 CAM=1,43	Armst08 CAM=2,79
10-Autoroute				
Urbaine	Jonqu06 CAM=0,65	Jonqu06 CAM=0,65	-	-
Péri-urbaine	Vaudr1an0607 CAM=1,18	Vaudr1an0607 CAM=1,18	-	-
Rurale	Bec10 CAM=1,49	Yamac1an0607 CAM=1,56	Nic10 CAM=1,65	-

6.4 Informations météorologiques

Dans cette étude, la localisation géographique de chaque section de référence est connue. Cela permet d'obtenir, pour chaque section et pour les périodes requises, les données climatiques horaires actuelles et futures (voir section 4.2). Ainsi, les variables climatiques atteindront le niveau 1 dans la hiérarchie de précision.

7. ÉTALONNAGE DES MODÈLES DE PERFORMANCE DANS LE LOGICIEL AASHTOWARE PMED

Un étalonnage spécifique aux conditions du Québec sera entrepris dans cette section en vue d'ajuster les coefficients d'étalonnage locaux des modèles d'endommagement du logiciel AASHTOWare PMED pour les chaussées souples. Un fichier *.csv a été généré pour chaque section de référence dans le logiciel AASHTOWare PMED correspondant aux informations de performance mesurées. L'étalonnage consiste à réduire l'erreur entre les prédictions du logiciel AASHTOWare PMED et les performances réelles des chaussées mesurées sur le terrain. Il comporte trois principales étapes, à savoir la vérification, la calibration et la validation. À l'aide de l'outil d'étalonnage CAT, la démarche de calibration commence par mettre en œuvre des vérifications initiales en se basant sur les coefficients d'étalonnage globaux. Des ajustements seront apportés dans un deuxième lieu aux coefficients d'étalonnage afin de réduire l'écart entre les mesures prédites et réelles et de minimiser le biais, définissant ainsi l'étape calibration. Un étalonnage local réussi ou non sera finalement conclu à travers le processus de validation, une fois que les mesures statistiques sont suffisamment proches de celles résultant de l'étalonnage local (étape calibration).

7.1 Examen préliminaire des données

Avant l'optimisation des coefficients d'étalonnage, un examen préliminaire des données a été réalisé conformément aux étapes 2 et 4 du guide d'étalonnage de l'AASHTO (AASHTO, 2020). Cet examen a permis de vérifier la nécessité d'un étalonnage local – après les vérifications initiales effectuées avec les coefficients globaux – et d'identifier d'éventuelles valeurs aberrantes ou tendances atypiques dans les données prédites et mesurées sur le terrain.

Lors de l'étape 2, une attention particulière a été portée aux valeurs d'endommagement mesurées maximales moyennes, qui idéalement doivent représenter au minimum 50 % des seuils de référence (voir Tableau 1). La comparaison avec les exigences de l'AASHTO et du MTMD (Tableau 40) a révélé que, pour la fissuration longitudinale de fatigue (FC), la valeur moyenne de dommage mesurée est inférieure aux 50 % recommandés. Toutefois, ces données ont été retenues pour l'étalonnage, car elles demeurent représentatives des conditions du réseau routier québécois. Par ailleurs, l'orniérage (O), la fissuration transversale (FT) et l'IRI respectaient les exigences (AASHTO et MTMD) en termes des valeurs d'endommagement mesurées maximales moyennes.

En complément, la matrice d'échantillonnage expérimental – organisée selon des critères tels que l'épaisseur, le trafic et les matériaux – a permis d'identifier rapidement toute source potentielle de biais. Cette vérification a conduit à la génération d'une matrice expérimentale dans l'outil CAT pour chaque type de dégradation.

**Tableau 40 : Vérification des exigences en termes des valeurs
d'endommagement mesurées maximales moyennes**

Indicateur de performance	Classe de route	Valeur de référence (AASHTO)	Seuil de déficience majeure (MTMD)	Valeur d'endommagement mesurée maximale moyenne
FC	Autoroutes et routes nationales	10% de la surface	50 m /200m de bande de roues avec fissuration majeure	3,82 % voie
	Routes régionales	20% de la surface		
	Routes locales	35% de la surface		
O	Autoroutes et routes nationales	10,2 mm	15 mm	8,82 mm
	Routes régionales	12,7mm		
	Routes locales (< 72 km/h)	16,5 mm		
FT	Autoroutes et routes nationales	110 m/km	6 fissures transversales de sévérité majeure	92,46 m/km
	Routes régionales	150 m/km		
	Routes locales	150 m/km		
IRI	Autoroutes et routes nationales	2,9 m/km	3,5 m/km	1,67 m/km
	Routes régionales	3,6 m/km	4,0 m/km	
	Routes locales	3,6 m/km	4,5 m/km	
			5,0 m/km	

Les vérifications initiales effectuées avec les coefficients globaux ont ensuite été lancées dans le CAT pour les différents projets. La partie 4 du guide d'étalonnage de l'AASHTO (AASHTO, 2020) vise à déterminer si un étalonnage local est nécessaire en examinant des indicateurs tels que le biais, l'erreur type, le coefficient de détermination et la p-valeur. La dispersion entre les mesures prédites et celles mesurées sur le terrain constitue également un indicateur important de la qualité de la calibration globale et a été considérée dans le processus de calibration. L'analyse des séries chronologiques n'a révélé aucun point de données isolé à exclure. Dans les prochaines sections, les résultats obtenus en utilisant les coefficients globaux sont présentés pour des fins de comparaison.

Enfin, des filtres ont été appliqués pour détecter d'éventuelles anomalies dans les mesures statistiques liées à l'épaisseur, au trafic ou au type de matériaux. Par exemple, pour la fissuration longitudinale de fatigue, une erreur type de 6,35 a été constatée pour des épaisseurs comprises entre 12,7 et 30,48 cm contre 0,51 pour des épaisseurs inférieures à 12,7 cm. Cette observation a conduit à privilégier l'optimisation du coefficient β_{f_1} – fortement dépendant de l'épaisseur de la couche – comme point de départ pour les scénarios d'optimisation.

7.2 Optimisation des coefficients d'étalonnage locaux pour les chaussées souples au Québec

L'exercice de calibration consiste à examiner la corrélation entre les valeurs prédites par les modèles de performance, présentés à la section 2.1.4, et celles mesurées sur le terrain pour différents scénarios d'optimisation. Des valeurs minimales et maximales ont été fixées pour les coefficients d'étalonnage en question en vue de réduire le biais et/ou l'erreur type. Ces deux mesures statistiques reflètent respectivement les erreurs dans le calcul ainsi que la qualité de la

dispersion des données autour de leur moyenne. Un biais et une erreur-type faibles, idéalement proches de zéro, augmentent la probabilité que les prédictions convergent vers les mesures sur le terrain. La concentration des données autour de la ligne d'égalité représentait également un critère pour inclure ou exclure les résultats des simulations. Des comparaisons avec la simulation initiale, menée en fonction des coefficients d'étalonnage globaux déjà prédéfinis par défaut dans l'outil CAT, ont permis l'ajustement des coefficients d'étalonnage. Un biais et une erreur type importants indiquent une sur ou sous-estimations des mesures réelles sur le terrain. Dans ces conditions, un étalonnage local paraît nécessaire pour les minimiser. Le processus d'étalonnage local s'achève une fois que les valeurs suggérées réduisent suffisamment le biais et l'erreur type.

Outre le biais et l'erreur type, afin d'évaluer la qualité de la calibration, les résultats de la prédiction ont été examinés à l'aide du coefficient de détermination R^2 et la probabilité d'occurrence d'un événement donné p-valeurs, ou la probabilité d'atteindre une valeur prédite égale à la valeur mesurée. La première mesure traduit la relation linéaire entre les données prédites et mesurées sur le terrain et est exprimée comme le rapport entre la somme des carrés des erreurs types prédites par l'outil CAT et leur moyenne. Un R^2 se situe entre 0 et 1. Plus il tend vers 1, plus les données sont concentrées autour de la ligne de régression (ligne d'égalité). La p-valeur permet de vérifier si les valeurs mesurées et prédites proviennent ou non des populations différentes. Elle devrait être supérieure ou égale à 0,05 pour que la simulation soit acceptée. En utilisant les coefficients globaux, les p-valeur n'étaient pas adéquates, renforçant le besoin de passer par un processus d'étalonnage local.

Le processus de calibration s'est appuyé essentiellement sur la démarche décrite dans le guide de l'AASHTO de 2010 et le guide d'étalonnage de l'AASHTO de 2020. L'itération des coefficients a aussi été basée sur la forme des lois d'endommagement et l'effet des divers coefficients sur la prédiction ainsi que sur le facteur sur lequel celui-ci agit. Outre les recommandations, le choix final des paramètres de calibration locaux s'est basé sur un jugement technique. Toutefois, l'identification des coefficients d'étalonnage causant les biais entre les mesures réelles et prédites demeurerait un défi tout au long du processus d'optimisation. L'ensemble des paramètres de calibration considérés étaient principalement :

- $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}, C_1$ et C_2 pour la fissuration longitudinale de fatigue (Équation (13)).
- $\beta_{r1}, \beta_{r2}, \beta_{r3}$ et β_{s1} pour l'Orniérage (Équation (4)).
- k_t pour la Fissuration Transversale (Équations (34) et (35)).
- C_1, C_2, C_3 et C_4 pour l'IRI (Équation (39)).

7.2.1 Coefficients d'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue

L'analyse initiale a été réalisée à l'aide des coefficients d'étalonnage globaux (Tableau 41). Cette première vérification a mis en évidence (Tableau 42), pour les 107 sections considérées, une dispersion importante des points autour de la ligne d'égalité, traduisant une faible corrélation entre les prédictions et les observations sur le terrain. De plus, une erreur type élevée et une p-valeur inférieure à 0,05 montrent qu'en utilisant les coefficients globaux, le modèle d'estimation de la fissuration de fatigue ne permettait pas de prédire de manière satisfaisante l'évolution de ce mode d'endommagement pour le réseau routier québécois (Figure 29). Tel que présenté au Tableau 42, en utilisant les paramètres fixés par le logiciel, il est possible d'apprécier comment certaines catégories des sections considérées basées sur le trafic, le type de sol ou l'épaisseur d'enrobé

(Hac) répondent aux paramètres d'ajustement globaux. Il est notamment constaté les sections caractérisées par un fort trafic (>2000) montrent un fort biais et une forte erreur-type. Également, la majorité des sections sont d'épaisseurs comprises entre 125 et 254 mm, mais cette catégorie montre un écart-type plus élevé que lorsque toutes les sections sont considérées. Finalement, certaines catégories présentent des indicateurs d'ajustement généralement satisfaisants, mais celles-ci comprennent un nombre de sections très faibles.

Tableau 41 : Coefficients d'étalonnage globaux pour la fissuration longitudinale de fatigue

β_{f1}			C_2					
H_{AC} $\leq 125mm$	125mm < H_{AC} < 305mm	H_{AC} > 305mm	β_{f2}	β_{f3}	C_1	H_{AC} $\leq 125mm$	125mm < H_{AC} < 305mm	H_{AC} > 305mm
0,02054	0	0,001032	1,38	0,88	1,31	2,1585	0	3,9666

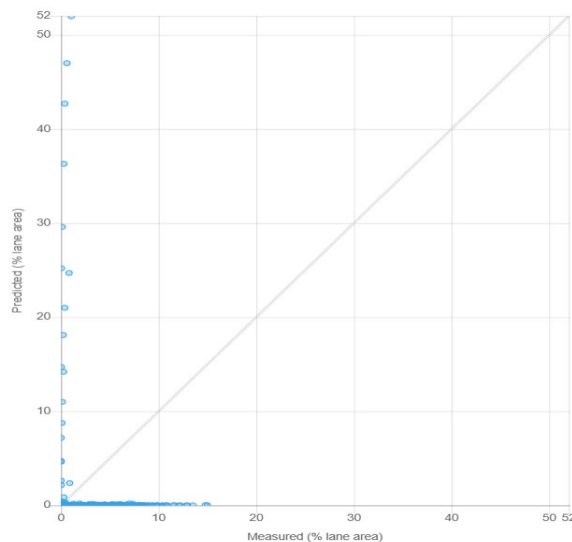


Figure 29 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des coefficients d'étalonnage globaux

Tableau 42 : Résumé de l'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue avec les coefficients globaux

Filtres	Stat. d'ajustement		N° sections	Test d'hypothèse p-valeurs		
	Biais	Écart Type		Pente	Intercept	P-valeur
Toutes les sections	-1.58	5.73	107	0	0.00004	0
<i>Hac < 127 mm</i>	-2.9	3.97	31	0	0.00008	0
<i>127 mm < Hac < 305 mm</i>	-1.14	6.35	73	0	0.00009	0.00023
<i>Hac > 305 mm</i>	0.19	0.51	3	0.00002	0.83050	0.14384
Sol de fondation à grains grossiers	-1.2	6.05	85	0	0.00006	0.00002
Sol de fondation à grains fins (plasticité faible)	-3.02	4.57	21	0	0.00149	0
Sol de fondation à grains fins (plasticité forte)	-1.74	2.5	1	0	0.85018	0.01216
AADTT>2000	5.29	14.11	11	0.03622	0.00025	0.00241
500<AADTT<2000	-1.8	3.04	59	0	0	0
AADTT<500	-3.58	5.07	37	0	0.13573	0

Afin d'améliorer la précision du modèle, différents scénarios d'optimisation ont été exécutés en ajustant successivement chacun des coefficients d'étalonnage. Le Tableau 43 présente les coefficients recommandés par l'AASHTO (AASHTO, 2010) pour réduire à la fois le biais et l'erreur type entre les valeurs mesurées et prédites.

L'ensemble des ajustements réalisés est présenté à l'annexe E. La démarche d'optimisation consistait à tester dans un premier temps les coefficients de calibration individuellement, avant d'évaluer différentes combinaisons de ces coefficients. Les premières tentatives d'ajustement impliquaient les coefficients de transfert C_1 et C_2 en raison de leur influence directe sur la dispersion des points autour de la ligne d'égalité. Une translation horizontale de la courbe est associée à C_1 , tandis que C_2 induit une translation oblique. Cependant, les simulations réalisées avec C_1 seul, quelle que soit la valeur testée, n'ont produit aucun changement notable dans le nuage de points. De même, l'ajustement de C_2 seul n'a pas permis d'améliorer la dispersion des points.

Ces constats ont conduit à envisager une approche combinée, en ajustant en même temps les coefficients C_1 et C_2 . La meilleure amélioration a été obtenue en combinant les ajustements des coefficients de transfert C_1 et $C_{2(127-305mm)}$. À titre indicatif, les scénarios suivants ont été évalués :

- $C_1 = 0,4$ et $C_{2(127-305mm)} = 0,4$
- $C_1 = 0,4$ et $C_{2(127-305mm)} = 0,5$
- $C_1 = 0,5$ et $C_{2(127-305mm)} = 0,5$

L'itération avec $C_1 = 0,5$ et $C_2 = 0,5$ a générée un biais de 1,63, légèrement supérieur au biais initial de -1,58, mais a permis de réduire l'erreur type de 5,73 à 4,89, tout en améliorant significativement la dispersion des données autour de la ligne d'égalité. Afin de raffiner davantage le modèle, l'impact des coefficients β_{f1} , β_{f2} et β_{f3} a été testé.

L'implication des coefficients β_{f1} et β_{f2} avec C_1 et $C_{2(127-305mm)}$ ont permis de diminuer les mesures statistiques, sans toutefois modifier significativement la concentration des données le long d'un axe (ordonnées ou abscisses). Cette analyse a notamment permis de conclure que β_{f1} et β_{f2} devait rester inchangés.

Concernant le coefficient β_{f3} , un scénario optimisé a été observé pour $C_1 = 0,5$, $C_{2(127-305mm)} = 0,5$ et $\beta_{f3} = 0,85$. Un biais de 0,66 et une erreur type de 4,15 ont été obtenus, avec une meilleure convergence des mesures vers la ligne d'égalité (Figure 30). L'ajustement s'est montré sensible à la valeur de β_{f3} , qui devait demeurer assez proche de la valeur par défaut (des valeurs allant jusqu'à 0,5 ont été considérées), pour arriver à obtenir une calibration locale satisfaisante.

En résumé, l'optimisation combinée des coefficients de transfert et des paramètres liés à la fissuration a permis d'améliorer significativement la précision des prédictions. Le processus de calibration détaillé, ainsi que l'optimisation des coefficients d'étalonnage, sont décrits plus en détails en Annexe E.

Tableau 43 : Optimisation des coefficients d'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue

Modèle de performance	Réduction du Biais	Réduction de l'Erreur Standard
Fissuration longitudinale de fatigue	C_2 et β_{f1}	β_{f2} , β_{f3} et C_1

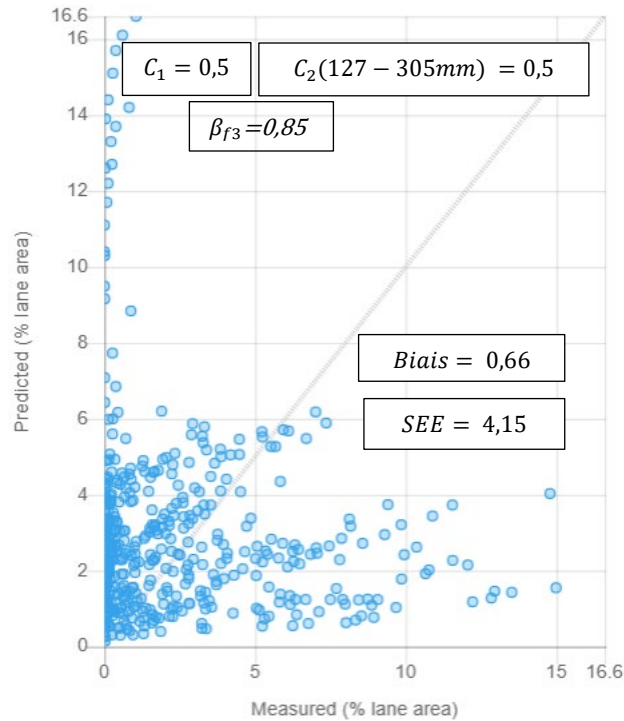


Figure 30 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des coefficients d’étalonnage locaux

7.2.2 Coefficients d’étalonnage pour l’Orniérage

La profondeur totale de l’ornière a été considérée dans le processus d’étalonnage local de la déformation permanente. Il a été effectué pour 192 sections référence dans l’outil CAT en impliquant les coefficients β_{r1} , β_{r2} , β_{r3} pour les couches bitumineuses et β_{s1} et β_{sg1} pour les couches de fondation et le sol support, respectivement. Le Tableau 44 présente les coefficients d’étalonnage globaux fixés pour la vérification initiale dans le cas de l’Orniérage. Les résultats de l’étalonnage ont fourni un biais et une erreur type importants avec une p-valeur inférieure à 0,05. Le modèle d’orniérage avec les paramètres globaux a surestimé l’orniérage des chaussées souples du réseau routier Québécois et l’hypothèse nulle a été rejetée (Tableau 45 et Figure 31).

Tableau 44 : Coefficients d’étalonnage globaux pour l’orniérage

β_{r1}	β_{r2}	β_{r3}	β_{s1}		β_{sg1}	
			Couche de fondation		Sol support	
0,4	0,52	1,36	1		1	

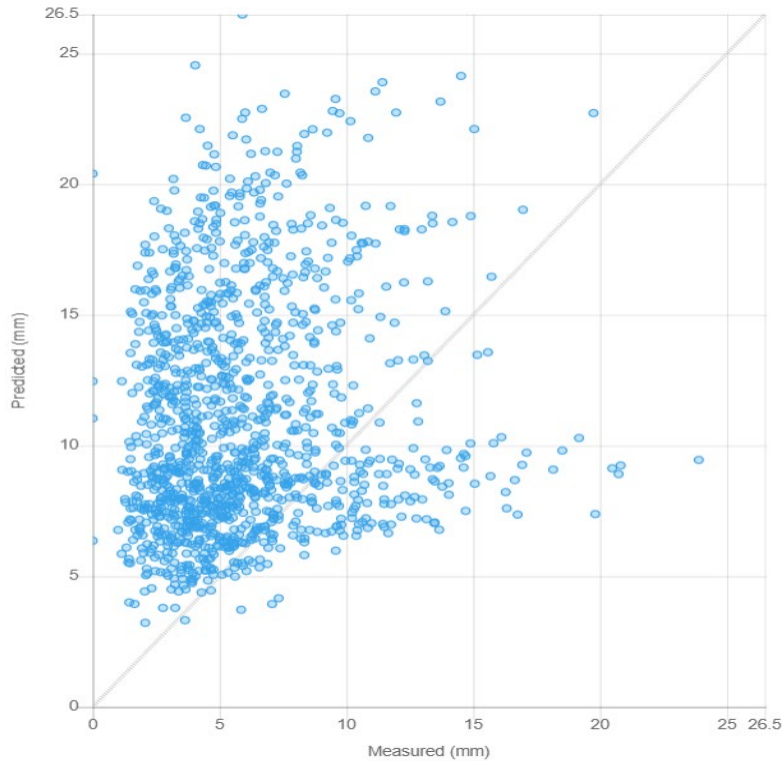


Figure 31 : Valeurs mesurées et prédites dans l'outil CAT pour l'Orniéage en fonction des coefficients d'étalonnage globaux

Tableau 45 : Résumé de l'étalonnage pour l'orniéage avec les coefficients globaux

Biais	Erreur Type	R^2	p-valeur	Commentaire
5,02	7,14	0,01	$0 < 0,05$	Rejetée

Le processus d'optimisation du modèle d'orniéage s'est basé sur les recommandations du guide d'étalonnage de l'AASHTO pour les coefficients d'étalonnage du Tableau 46 afin de réduire le biais et l'erreur type entre les valeurs mesurées et prédites. Une première fourchette pour β_{r1} a été d'abord sélectionnée pour couvrir l'intervalle [0,1; 0,5]. Le biais et l'erreur type passent respectivement de 5,02 et 7,14 à 1,69 et 4,08 pour une mesure de $\beta_{r1} = 0,1$. Les itérations impliquant β_{r1} supérieures à la valeur globale de 0,4 ont permis non seulement l'éloignement des mesures de la ligne d'égalité dans la direction de l'axe des prédictions mais également l'augmentation des mesures statistiques. En contrepartie, un écrasement des données a été observé suite à des valeurs de β_{r1} inférieures à 0,1. Une meilleure dispersion des données autour de la ligne d'égalité a été observée pour un coefficient d'étalonnage β_{r1} de l'ordre de 0,15 et 0,2. Des mesures statistiques de l'ordre de 0,88 pour le biais et 3,64 pour l'erreur type ont été observées lors de l'optimisation du coefficient β_{r2} à une valeur de 0,3. Un coefficient β_{r3} compris entre [1,25; 1,4] a généré un biais et une erreur type légèrement inférieurs de l'ordre de 3,73 et 5,88, respectivement. Un coefficient β_{sg1} pour la couche de sous-fondation de 0,5 a réduit le biais

et l'erreur type de 5,02 et 7,14 à 2,39 et 5,37. Fait intéressant, l'implication du coefficient β_{sg1} pour le sol support avec β_{r1} ou β_{r2} ou β_{r3} a provoqué un aplatissement des données. Finalement, seules les itérations impliquant à la fois les coefficients β_{s1} et β_{sg1} généraient des scénarios optimums. Quelques combinaisons testées sont récapitulées au Tableau 47.

Tableau 46 : Optimisation des coefficients d'étalonnage pour l'Orniérage

Modèle de performance	Réduction du Biais	Réduction de l'Erreur Standard
Orniérage	β_{r1}	$\beta_{r2}, \beta_{r3}, \beta_{s1}, \beta_{sg1}$

Tableau 47 : Exemples de quelques combinaisons impliquant à la fois les coefficients β_{s1} et β_{sg1}

β_{r1}	β_{r2}	β_{r3}	β_{s1}	β_{sg1}	Biais	Erreur-Type	P-valeur
0,4	0,52	1,36	0,1	0,1	-1,37	4,73	0
0,4	0,52	1,36	0,1	0,5	0,43	4,62	0,00279
0,4	0,52	1,36	0,5	0,1	-0,49	4,66	0,00071
0,4	0,52	1,36	0,5	0,2	-0,04	4,63	0,75921
0,4	0,52	1,36	0,2	0,2	-0,70	4,61	0
0,4	0,52	1,36	0,2	0,3	-0,25	4,57	0,08301
0,4	0,52	1,36	0,3	0,2	-0,48	4,60	0,00087
0,4	0,52	1,36	0,3	0,3	-0,06	4,59	0,6990
0,4	0,52	1,36	0,25	0,25	-0,36	4,59	0,01123
0,4	0,52	1,36	0,25	0,3	-0,14	4,58	0,33117
0,4	0,52	1,36	0,3	0,25	-0,26	4,59	0,07599
0,4	0,52	1,36	0,32	0,32	0,10	4,6	0,47673
0,4	0,52	1,36	0,35	0,35	0,30	4,62	0,03655
0,4	0,52	1,36	0,3	0,35	0,19	4,60	0,17916
0,4	0,52	1,36	0,35	0,3	0,08	4,60	0,58864

Bien que le biais et l'erreur type se sont révélés faibles pour les différentes combinaisons qui ont été testées, le scénario $\beta_{s1} = 0,3$ et $\beta_{sg1} = 0,3$ a été retenu. Il satisfaisait non seulement l'objectif de minimiser les mesures statistiques mais permet également d'optimiser la dispersion des points autour de la ligne d'égalité et de respecter la condition l'hypothèse nulle ($p_{valeur} > 0,05$) (Figure 32). Les prédictions de l'Orniérage qui étaient fortement surestimées en fonction des coefficients d'étalonnage globaux se trouvent plus concentrées autour de la ligne d'égalité avec l'utilisation des coefficients de calibration locaux. Soulignons que l'implication des paramètres β_{r1} ou β_{r2} ou β_{r3} avec les combinaisons les plus optimales n'a pas amélioré les résultats de la simulation. Plus de détails sont fournis dans l'Annexe E pour les résultats des analyses paramétriques effectués avec l'outil CAT.

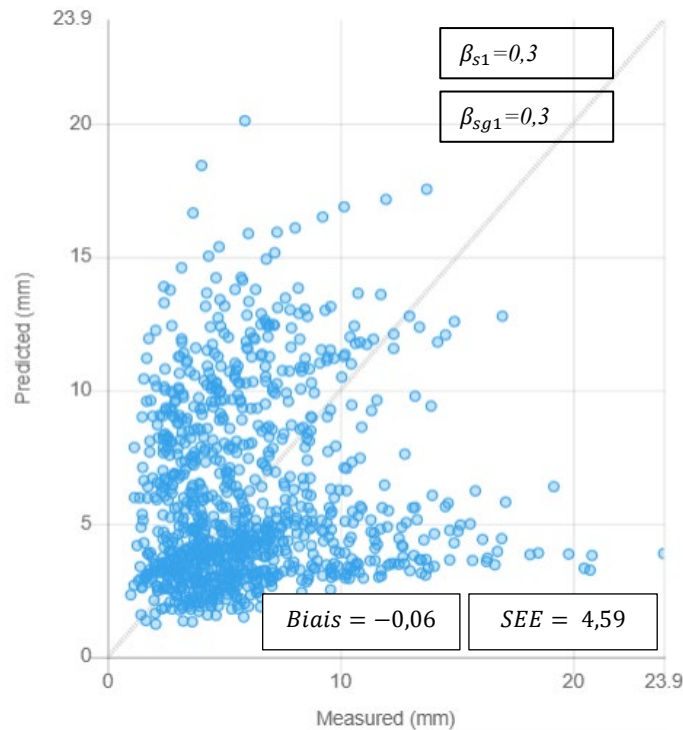


Figure 32 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour l’Orniérage en fonction des coefficients d’étalonnage locaux

La calibration des modèles d’orniérage dans AASHTOWare PMED a mis en évidence une surestimation systématique des profondeurs d’orniérage lors de l’utilisation des coefficients globaux. Le biais initial atteignait 5,02 mm (Tableau 45), accompagné d’une forte dispersion (erreur-type : 7,14 mm) et d’un coefficient de détermination quasi nul ($R^2 = 0,01$), soulignant une inadéquation marquée entre les prédictions du modèle et les observations terrain. Ces écarts peuvent par exemple s’expliquer par les caractéristiques climatiques et géotechniques propres au Québec, ainsi que les pratiques différentes au niveau du dimensionnement ou des exigences pour les matériaux.

L’optimisation s’est concentrée sur les coefficients β_{s1} (couche de fondation) et β_{sg1} (sol support). La réduction de β_{s1} et β_{sg1} de 1,0 à 0,3 (Tableau 47) a permis de corriger 52 % du biais, témoignant de la forte influence des conditions de sol propres au Québec sur l’orniérage.

La combinaison optimale des coefficients ($\beta_{s1} = 0,3 / \beta_{sg1} = 0,3$, Figure 32) a permis d’atteindre un biais résiduel négligeable (-0,06 mm), combinée avec une p-valeur de 0,699 qui a permis de confirmer la validité de l’hypothèse nulle. L’erreur-type résiduelle, réduite à 4,59 mm, reflète toutefois des incertitudes non modélisées, telles que l’hétérogénéité des compactages. Ces limites, inhérentes aux modèles mécanistique-empiriques, résultent en partie de l’incertitude épistémique du système, mais restent acceptables au vu de la complexité et de la variabilité des données utilisées pour l’étalonnage.

7.2.3 Coefficients d'étalonnage pour la Fissuration Transversale

La réduction du biais et de l'erreur type entre les valeurs prédites et mesurées dans le cas de la Fissuration Transversale s'appuie principalement sur l'optimisation du coefficient d'étalonnage global k_t . Il dépend de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et il se présente dans l'outil de calibration (CAT) pour trois niveaux de précision différents. Cette approche à trois niveaux, spécifique au modèle de fissuration thermique, vient d'une forte sensibilité au niveau des paramètres d'entrée. Des coefficients d'étalonnage dépendants du niveau des paramètres d'entrée du bitume ont été proposés pour compenser les biais induits par des entrées de plus faible fidélité. Par exemple, le modèle de fissuration thermique pouvait prédire la fissuration sur le terrain lorsqu'il était fourni avec des données détaillées de niveau 1, mais lorsque seuls les intrants de niveau 3 (estimations par défaut) étaient utilisés, les performances du modèle se dégradèrent, montrant de « mauvaises performances » (tendances d'erreur inacceptables) dans la prédiction des fissures transversales. Ainsi, dans ce cas, différentes valeurs de coefficients de calibration peuvent être proposées selon la température ($14^{\circ}\text{C} < T < 14^{\circ}\text{C}$), mais aussi selon le niveau de détails des paramètres d'entrée pour les caractéristiques des enrobés. Le Tableau 48 présente les coefficients d'étalonnage globaux fixés pour la vérification initiale dans le cas de la Fissuration Transversale. Tel que reporté au Tableau 49 et sur la Figure 33, le modèle de fissuration transversale avec les paramètres globaux a sous-estimé la fissuration transversale des chaussées souples du réseau routier Québécois; un biais et une erreur type importants ont été observés et l'hypothèse nulle a été rejetée. Il est à noter que 80 sections ont été exploitées pour entreprendre la vérification initiale dans le cas de la Fissuration Transversale.

Tableau 48 : Coefficients d'étalonnage globaux pour la Fissuration Transversale (Vérification initiale)

Niveaux	MAAT	k_t		
		Min	Max	Valeur retenue
Niveau 1	> 57 °F (13,8 °C)	0	0	0
	≤ 57 °F (13,8 °C)	0	0	0
Niveau 2	> 57 °F (13,8 °C)	0	0	0
	≤ 57 °F (13,8 °C)	0	0	0
Niveau 3	> 57 °F (13,8 °C)	0	0	0
	≤ 57 °F (13,8 °C)	0	0	0

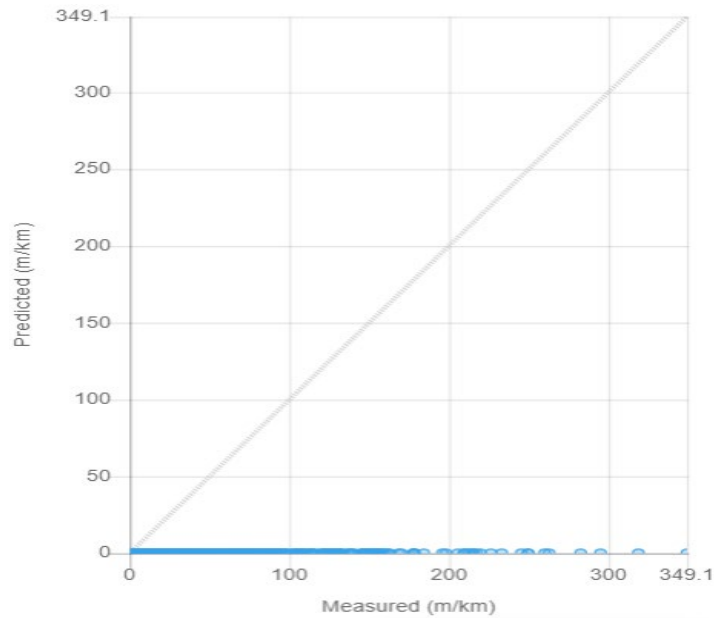


Figure 33 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour la Fissuration Transversale en fonction des coefficients d'étalonnage globaux

Tableau 49 : Résumé de l'étalonnage pour la Fissuration Transversale avec les coefficients globaux (Vérification initiale)

Biais	Erreur Type	R^2	p-valeur	Commentaire
-51,63	80,15	0	0<0,05	Rejetée

Dans l'équation de la Fissuration Transversale, le coefficient d'étalonnage k_t n'est pas un multiplicateur direct (Tableau 6). Il est fortement lié à la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et doit être optimisé en exécutant plusieurs simulations pour différents niveaux de précision (1, 2 et 3) et différents intervalles de températures $> 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\leq 14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Des valeurs minimales et maximales ont été suggérées dans le but de minimiser les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Après un grand nombre de tentatives, le biais et l'erreur type restaient constants aux alentours de -51,63 et 80,15. À titre de solution, une plage plus large pour k_t , définie entre une valeur minimale de 1 et une valeur maximale de 50, a été mise à l'essai. Néanmoins, aucun changement au niveau du biais et d'erreur type a été observé. Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'expression du coefficient d'étalonnage k_t développée lors de l'étalonnage global n'est pas adaptée aux conditions locales du Québec. En somme, les prédictions se trouvent toujours concentrées sur l'axe des abscisses (Figure 34).

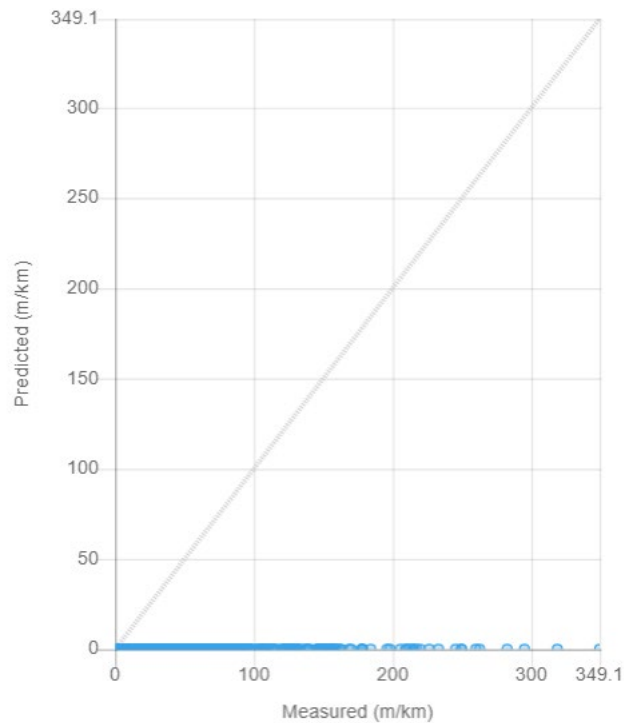


Figure 34 : Valeurs mesurées et prédites sous l’outil CAT pour la Fissuration Transversale en fonction des coefficients d’étalonnage locaux

Ces résultats sont en corrélation avec des travaux antérieurs menés à l’échelle des États-Unis qui soutiennent davantage l’idée que l’étalonnage local de la Fissuration Transversale ne peut pas apporter des réponses satisfaisantes en termes de prédictions. En effet, bien que des mesures significatives pour la Fissuration Transversale aient été observées sur le terrain, des prédictions minimales voire nulles ont été signalées à l’échelle globale. Le National Center for Asphalt Technologies (NCAT 2017) a réalisé un sommaire des différents efforts de calibration pour la fissuration transversale. En Arizona, l’étalonnage global dans le cas des chaussées souples a sous-estimé la fissuration transversale. Malgré les tentatives d’ajustement du coefficient de calibration K avec des valeurs allant jusqu’à 100, une surestimation dans les cas de faibles fissurations a été observée. Avec cette valeur, seuls les niveaux élevés de fissuration mesurés ont pu être reproduits. En contrepartie, une valeur de 50 n’était pas convenable pour toutes les zones climatiques. En Iowa, le modèle de fissuration thermique n’a pas été retenu pour une calibration locale en raison de l’écart important entre les fissures thermiques mesurées et celles prédites. Dans le Nord-Est des États-Unis, les données mesurées sur 17 sections du LTPP n’ont pas montré l’évolution temporelle attendue, probablement en raison d’erreurs de mesure, ce qui a également empêché toute tentative de calibration. En Oregon, la calibration locale n’a pas permis d’améliorer les prédictions. Dans l’étude de Schwartez et al. (2011) et Hall et al. (2011), ceci était attribué à la classe du bitume initiale du projet qui s’est montré non appropriée pour les conditions climatiques locales. De telles observations ont été signalées par les experts de Applied Research Associates (ARA) dans le cas de ce présent projet. Un bitume de classe initiale PG 58-34 a généré des mesures nulles pour la Fissuration Transversale sur une durée de 20 ans, tandis qu’avec une classe PG 64-22, les résultats étaient plus sensibles à la Fissuration Transversale avec une valeur de 16 m/km après 20 ans. Également, les experts de ARA ont mis de l’avant la relation de la valeur K_t développée au cours des efforts d’étalonnage globaux qui peut ne pas être

appropriée aux conditions locales du Québec. En ce sens, le modèle de la Fissuration Transversale n'a pas pu être étalonné à l'échelle locale. Dans ces conditions, le développement des nouvelles expressions spécifiques aux conditions locales du Québec s'avère nécessaire. Plus de détails sont fournis dans L'annexe E.

7.2.4 Coefficients d'étalonnage pour l'Indice de Rugosité Internationale

Bien que les coefficients de calibration C_1 , C_2 , C_3 et C_4 de l'équation 39 soient pris en compte dans le modèle de prédiction de l'IRI, la détermination de la rugosité initiale IRI_0 demeure problématique. Ce paramètre caractérise le confort au roulement au cours des six premiers mois suivant la construction. Aucune fonctionnalité de l'outil CAT ne permet d'estimer IRI_0 à partir des séries historiques d'IRI. En l'absence d'un tel ajustement, l'outil tend à surestimer IRI_0 , décalant ainsi le nuage de points vers des niveaux de rugosité plus élevés que ceux observés sur le terrain (Figure 35a). Le processus d'ajustement décrit ci-dessous a permis d'estimer plus précisément IRI_0 pour chaque section de référence et de recentrer le nuage de points, de sorte que les valeurs calculées reflètent mieux les mesures (Figure 35b).

Plusieurs administrations routières ont proposé des solutions pour corriger IRI_0 lors de l'étalonnage du modèle d'endommagement. L'une d'elles consiste à introduire l' IRI_0 mesuré sur le terrain (entrée de niveau 1). Le ministère des Transports de l'Ontario (MTO, 2014) recommande, pour les chaussées neuves, une plage de 0,65 à 1,00 m/km, cohérente avec la valeur par défaut de l'outil CAT. La base de données d'étalonnage Superpave indique, pour la première année, une plage plus large de 0,72 à 1,97 m/km (Yuan et al., 2017).

La démarche retenue a consisté à estimer, pour chaque projet utilisé dans l'étalonnage du modèle de prédiction de l'IRI, la valeur initiale IRI_0 plutôt que d'adopter la valeur par défaut de 1,0 m/km proposée dans le CAT, conformément au manuel (AASHTO, 2014). Comme les IRI mesurés en début de vie étaient souvent inférieurs ou proches de 1,0 m/km, l'usage systématique de cette valeur entraînait une surestimation des prédictions.

Les données d'auscultation ont été extraites au format CSV à partir du système de gestion des chaussées du MTMD (GCH-6011), puis post-traitées sous Excel. L'objectif était de définir un IRI_0 représentatif des conditions réelles initiales en s'appuyant sur la tendance des séries historiques d'IRI.

L'estimation d' IRI_0 a été obtenue par régression (Figure 36). Deux formes ont été testées pour chaque section: linéaire et exponentielle. Après ajustement des données, le modèle offrant le meilleur compromis d'adéquation a été retenu, et IRI_0 a été pris comme l'ordonnée à l'origine au temps 0 mois. Le choix final du modèle à utiliser pour chaque section a été entériné par le MTMD. Dans la majorité des cas, la tendance linéaire a été privilégiée; quelques sections ont été mieux décrites par une forme exponentielle. Dans le cas du projet illustré à la Figure 36 (Projet 119), une tendance exponentielle a été retenue.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

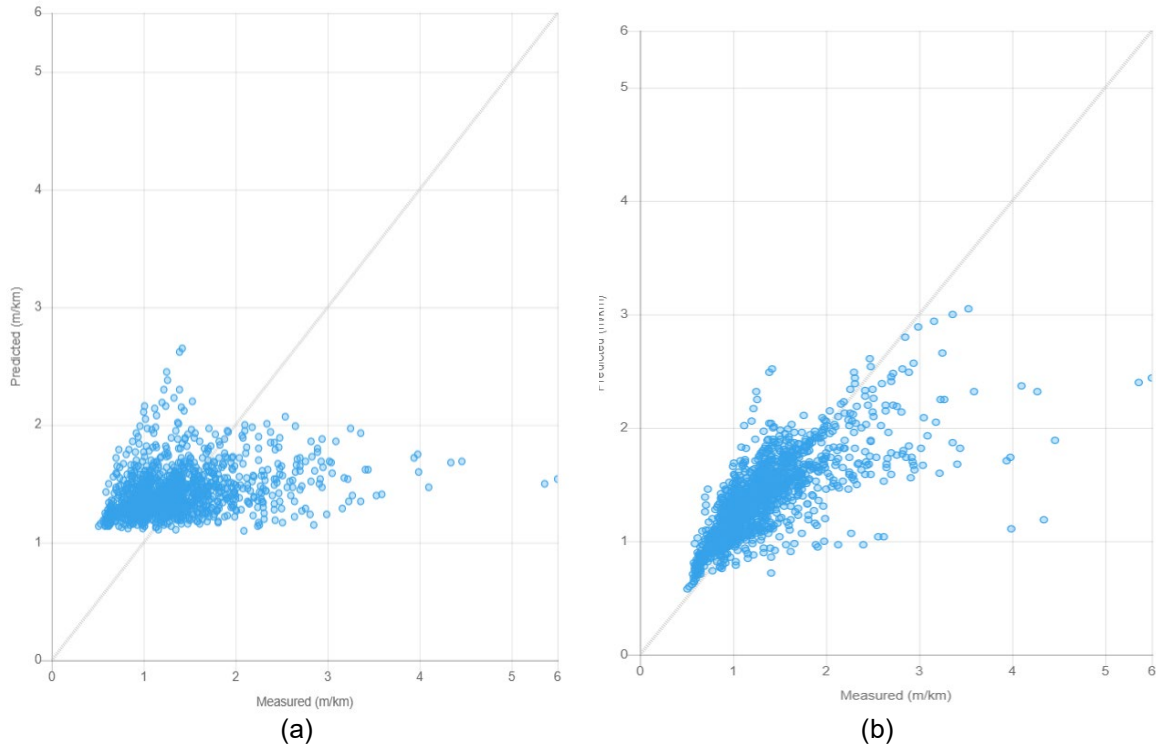


Figure 35 : Exemple de nuage de points dans le cas de la vérification initiale. (a) sans l’ajustement de l’ IRI_0 , (b) avec l’ajustement de l’ IRI_0

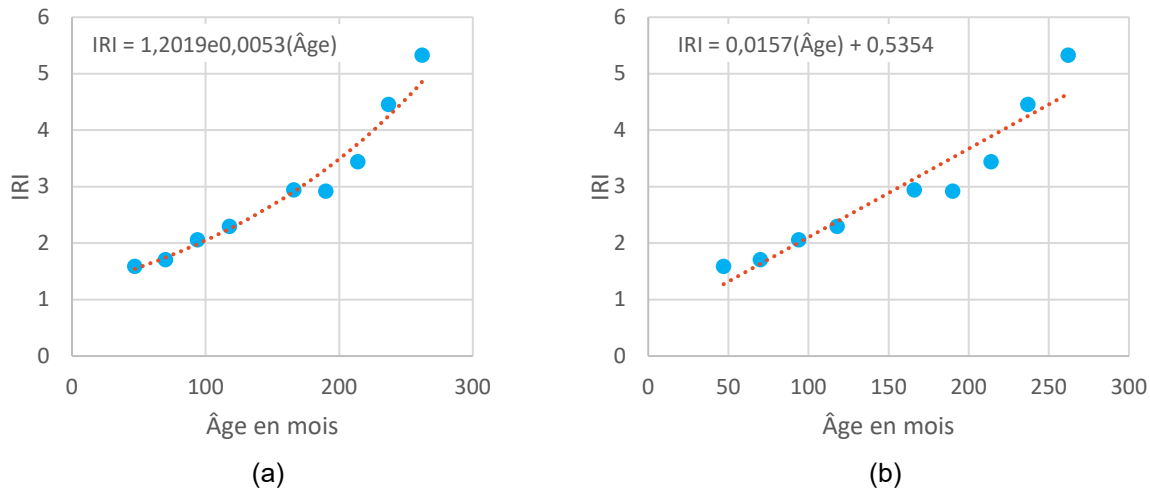


Figure 36 : Corrélation de la valeur IRI_0 , Projet 119 : (a) par une tendance exponentielle, (b) par une tendance linéaire

Après correction de IRI_0 , l’évaluation initiale a donné un biais de 0,03 m/km, une erreur type de 0,41 m/km, une p-valeur $\approx 0,00242$ (rejet de l’hypothèse nulle) et $R^2 = 0,52$, sur 183 sections. Une

optimisation des coefficients d'étalonnage a alors été entreprise pour réduire la dispersion autour de la ligne d'égalité et satisfaire l'hypothèse nulle (Tableau 50, Figure 37).

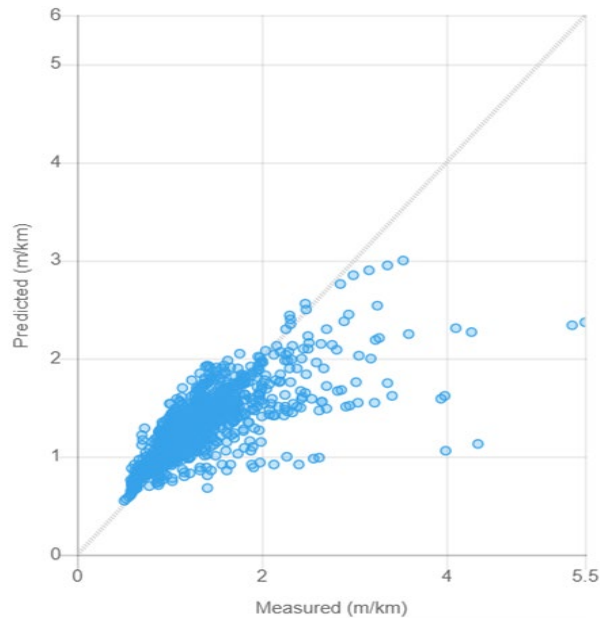


Figure 37 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'IRI en fonction des coefficients d'étalonnage globaux

Tableau 50 : Résumé de l'étalonnage pour l'IRI avec les coefficients globaux

Biais	Erreur Type	R^2	p-valeur	Commentaire
0,03	0,41	0,52	0,00242 < 0,05	Rejetée

Premièrement, l'optimisation de C_1 a conduit, pour $C_1 = 35$, à un biais de 0,00 m/km, une erreur type de 0,40 m/km et une p-valeur $\approx 0,88162$. Les itérations sur C_2 et C_3 , prises isolément ou combinées à d'autres coefficients, n'ont pas été concluantes. L'exploration de C_4 a indiqué que la valeur par défaut $C_4 = 0,015$ pouvait être conservée. Plus de détails sont fournis sur l'ensemble des simulations dans l'annexe E.

Au terme des simulations, le scénario retenu (Figure 38) avec $C_1 = 35$ et $C_2 = 0,5$ présente un biais nul, une erreur type de 0,40 m/km, $R^2 = 0,52$ et une p-valeur $\approx 0,99$. Ces performances satisfont aux seuils recommandés par le NCHRP Report 720 (2012) pour les modèles mécaniques-empiriques. Les ajustements sur C_1 reflètent l'influence dominante des déformations permanentes induites par le trafic et des conditions de site propres au contexte québécois, tandis que l'impact de C_2 demeure plus marginal (fissuration longitudinale en ornière et fissuration transversale thermique) par rapport aux paramètres de référence américains.

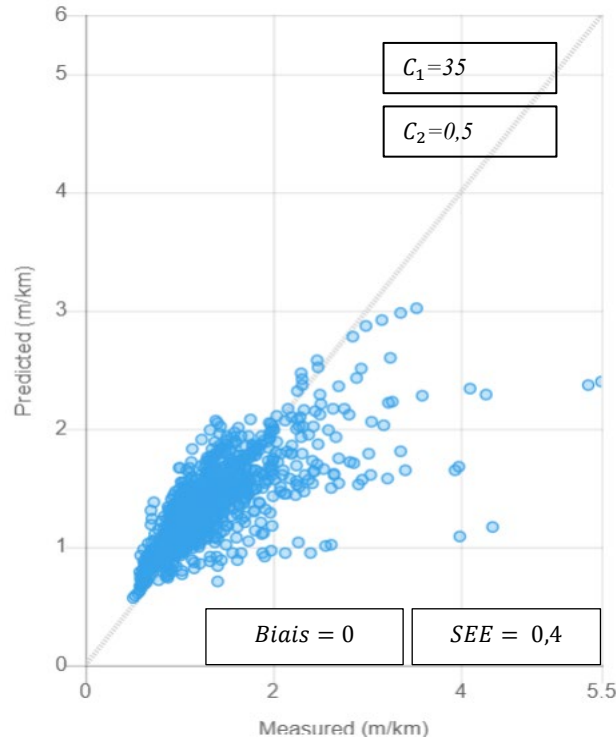


Figure 38 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'IRI en fonction des coefficients d'étalonnage locaux

7.2.5 Synthèse des coefficients d'étalonnage locaux

Outre le type de données explorées sur le sol, le trafic et les matériaux, de nombreuses hypothèses ont été formulées dans le cadre de ce projet d'étalonnage. Il a été notamment choisi de travailler avec un grand nombre de sections obtenues par l'auscultation à l'échelle réseau. Bien que la puissance statistique de l'étalonnage en soit augmentée, la qualité et la précision des données sont moins optimales, car des données réseau sont moins précises et contrôlées que celles obtenues à une échelle locale. Faute de manque de données pédologiques fiables et précises, par exemple obtenues par forages, pour chacune des sections de référence, des données générales à grande échelle ont été utilisées pour les dépôts de surface et des hypothèses sur les propriétés des matériaux ont été considérées sachant qu'elles sont modérément variables et peuvent affecter les résultats des calculs.

Pour ce qui est du trafic et distribution de charges axiales, des données de quelques stations de comptage ont été explorées afin de d'obtenir des CAM représentatifs de celui de la classe de route de chaque section. Cette approche a été considérée pour remédier au manque d'informations sur ces paramètres pour toutes les sections.

À l'issue du processus d'étalonnage du logiciel AASHTOWare PMED, les modèles de prédiction calibrés localement pour le Québec offrent une meilleure estimation de la performance que ceux obtenus avec des coefficients globaux. Le Tableau 51 présente la synthèse des coefficients d'étalonnage locaux retenus pour les chaussées souples du réseau du MTMD. Ces coefficients ont été sélectionnés sur la base de comparaisons entre les prédictions et les mesures de

performance réalisées sur le terrain, et se distinguent par des biais et des erreurs types réduits, ainsi qu'une répartition plus homogène des données autour de la ligne d'égalité. Ils seront utilisés pour projeter les modèles de performance dans le contexte des prévisions climatiques futures au Québec.

Il convient de préciser que les combinaisons de coefficients permettant d'obtenir les biais et erreurs types minimaux n'ont pas été systématiquement retenues. Une attention particulière a été portée à choisir des valeurs assurant une dispersion uniforme des points autour de la ligne d'égalité et une plage de valeurs prédites similaire à celle des mesures sur le terrain.

Pour évaluer la qualité et la cohérence des résultats, une comparaison avec la littérature a été effectuée. Des similitudes notables ont été observées avec les travaux de Gong et al. (2017) concernant la fissuration longitudinale de fatigue. En effet, l'étalonnage global montrait des données concentrées le long de l'axe des ordonnées, avec un biais et une erreur type élevés, et aucune amélioration de la dispersion n'avait été signalée lors d'un webinaire organisé par des experts de l'ARA en 2020. En revanche, pour l'orniérage et l'IRI, les modèles calibrés localement présentent systématiquement une meilleure qualité de prédiction, avec des mesures statistiques réduites après simulation. En prenant l'exemple de l'IRI en Ontario (Yan et al., 2017), la calibration locale de modèle d'IRI s'est concentrée uniquement sur les deux premiers coefficients du modèle: C_1 (lié à l'orniérage) et C_2 (lié à la fissuration par fatigue). En utilisant les valeurs réelles de l'IRI initial pour chaque section, les coefficients calibrés étaient $C_1 = 55.0960$ au lieu de 40 et $C_2 = 1.0883$ au lieu de 0.4. En comparaison avec la calibration globale, l'erreur-type est restée inchangée mais le biais a été réduit ce qui indiquait une amélioration des prédictions du modèle d'IRI.

Dans l'ensemble, ces comparaisons confirment la cohérence et la fiabilité des résultats obtenus par l'étalonnage local.

Tableau 51 : Synthèse des coefficients d'étalonnage locaux pour les chaussées souples au Québec

Endommagement		Coefficient d'étalonnage	Global (G)	Local (L)	Biais	SEE
Fissuration longitudinale de fatigue	β_{f1}	Ép. < 5 pc	0,02054	0,02054		
		5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0		
		Ép. > 12 pc	0,001032	0,001032		
		β_{f2}	1,38	1,38		
		β_{f3}	0,88	0,85	-1,58 (G)	5,73 (G)
		C_1	1,31	0,5	0,66 (L)	4,15 (L)
	C_2	Ép. < 5 pc	2,1585	2,1585		
		5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0,5		
		Ép. > 12 pc	3,9666	3,9666		
Orniérage	β_{r1}		0,4	0,4		
			0,52	0,52	5,02 (G)	7,14 (G)
			1,36	1,36		
	β_{s1} (couche de fondation)	1	0,3	-0,06 (L)	4,59 (L)	
	β_{s1} (couche de forme)	1	0,3			
Fissuration Transversale	k_t	0	Formule non appropriée aux conditions du Québec			

IRI	C_1	40	35	0,03	0,41
	C_2	0,4	0,5	(G)	(G)
	C_3	0,008	0,008	0 (L)	0,40
	C_4	0,015	0,015		(L)

7.3 Validation

Le processus d'étalonnage du logiciel AASHTOWare Pavement ME Design s'achève par la validation (partie 6 du guide d'étalonnage de l'AASHTO (2020)). Elle constitue une étape importante pour démontrer le potentiel des modèles calibrés localement à prédire adéquatement les dommages des chaussées sur le terrain. Une base de données indépendante des sections de chaussées est requise à cette fin. Des mesures statistiques (biais, erreur type et p-valeur) proches de celles générées lors de l'étalonnage local sont fortement souhaitées pour juger de la qualité de la validation. Cette étape est automatisée dans l'outil CAT, il fractionne systématiquement l'ensemble des projets entre les processus de calibration et de validation en utilisant l'approche traditionnelle d'échantillonnage fractionné. Environ 80 % du total des sections de référence retenues dans le CAT, choisies au hasard, ont été utilisées pour la détermination des coefficients d'étalonnage locaux, tandis que les 20 % restantes, se présentaient comme une base de données indépendantes pour le processus de validation. Dans notre projet, la validation de la fissuration longitudinale de fatigue (FC), l'Orniérage (O) et l'IRI a été réalisée avec le nombre de sections de références du réseau routier Québécois, présentées au Tableau 52. L'étalonnage local dans le cas de la Fissuration Transversale n'a pas été satisfaisant. Aucune validation n'a été entreprise dans ces conditions.

Tableau 52 : Nombre de sections retenues pour la validation

Type de dommage	Nombre total de projets	Nombre de projets pour la calibration	Nombre de projets pour la validation
FC	107	86	21
O	192	154	38
IRI	183	147	36

7.3.1 Validation du modèle de la fissuration longitudinale de fatigue

Un nombre de 21 sections a été sélectionné au hasard pour la validation du modèle de la fissuration longitudinale de fatigue. Il a été signalé que le biais et l'erreur type étaient davantage réduits par rapport aux résultats de calibration locale (Figure 39 et Tableau 53). Ils sont de l'ordre de 0,08 et 2,97. Une p-valeur de 0,78123 supérieure à 0,05 a été également générée lors de la validation.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

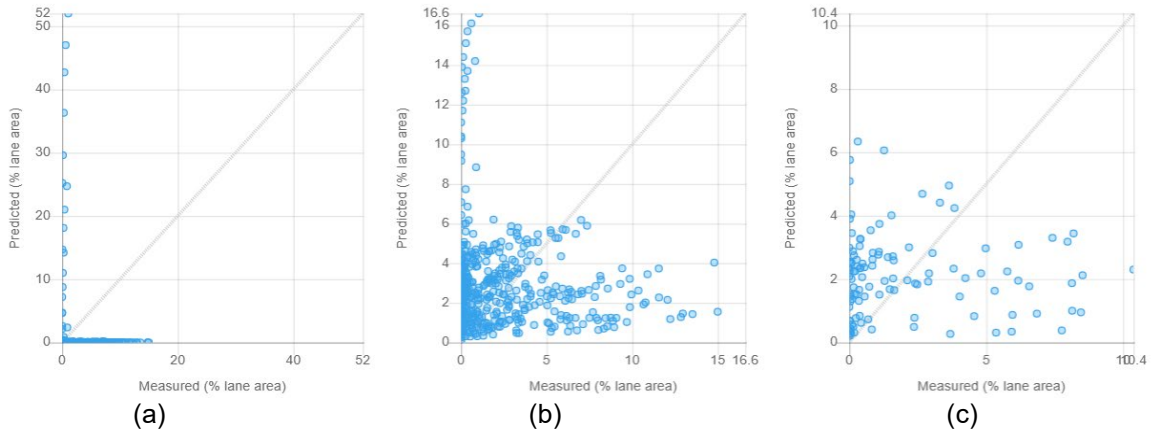


Figure 39 : Valeurs mesurées et prédites dans l’outil CAT pour la fissuration longitudinale de fatigue. (a) Vérification initiale, (b) Étalonnage local et, (c) Validation

Tableau 53 : Résumé des mesures statistiques pour la fissuration longitudinale de fatigue

	Vérification initiale	Étalonnage local	Validation
Nombre de sections	107	86	21
Biais	-1,58	0,66	0,08
Erreur Type	5,73	4,15	2,97
R^2	0,01	0,01	0
p-valeur	0	0,00058	0,78123

7.3.2 Validation du modèle d’Orniérage

La validation du modèle d’Orniérage faisait appel à un nombre de 38 sections choisies arbitrairement. Les prédictions faites pour l’ensemble de données de validation à l’aide des coefficients calibrés localement ont montré un bon accord avec les valeurs mesurées et une amélioration par rapport au modèle d’orniérage calibré globalement en termes de biais et d’erreur type (Figure 40 et Tableau 54).

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

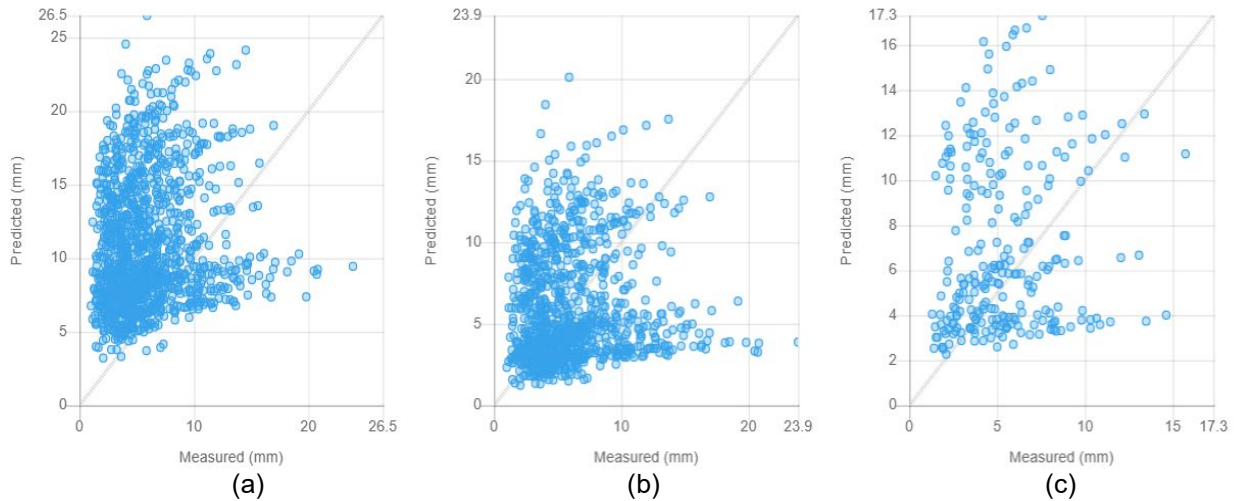


Figure 40 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'Orniérage. (a) Vérification initiale, (b) Étalonnage local et, (c) Validation

Tableau 54 : Résumé des mesures statistiques pour l'Orniérage

	Vérification initiale	Étalonnage local	Validation
Nombre de sections	192	154	38
Biais	5,02	-0,06	1,63
Erreur Type	7,14	4,59	4,67
R^2	0,01	0,01	0,01
p-valeur	0	0,6990	0

7.3.3 Validation du modèle de l'Indice de Rugosité Internationale

Un nombre de 36 sections a été utilisé pour la validation dans le cas de l'Indice de Rugosité Internationale. Une p-valeur de 0,63305 générée lors de la validation a permis d'accepter la condition de l'hypothèse nulle. Comparée à la vérification initiale, un biais plus faible a été observé (Figure 41 et Tableau 55).

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

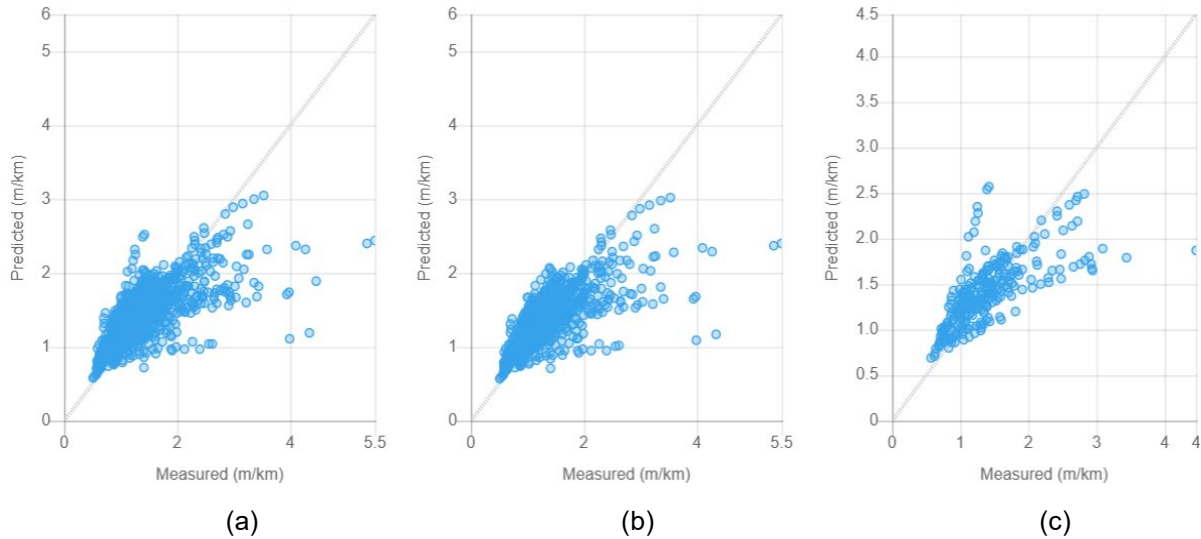


Figure 41 : Valeurs mesurées et prédites sous l'outil CAT pour l'Indice de Rugosité Internationale. (a) Vérification initiale, (b) Étalonnage local et, (c) Validation

Tableau 55 : Résumé des mesures statistiques pour l'Indice de Rugosité International

	Vérification initiale	Étalonnage local	Validation
Nombre de sections	183	147	36
Biais	0,03	0	0,01
Erreur type	0,41	0,40	0,41
R^2	0,52	0,52	0,48
p-valeur	0,00242	0,99094	0,63305

La validation des modèles prédictifs constitue une étape cruciale dans l'ingénierie des chaussées, tant pour la conception que pour la gestion des infrastructures routières. L'utilisation d'un jeu de données indépendant, organisé selon une stratégie d'échantillonnage fractionné (80 % pour la calibration et 20 % pour la validation), contribue à réduire le risque de surapprentissage et à améliorer la généralisation du modèle aux conditions réelles. La diminution notable du biais et de l'erreur type lors de la validation démontre qu'une adaptation des coefficients aux spécificités régionales est indispensable pour obtenir des prédictions fiables, conformément à la littérature existante. Par ailleurs, le recours à des indicateurs statistiques tels que la p-valeur garantit la robustesse des résultats en validant l'hypothèse nulle et en quantifiant l'incertitude associée à la variabilité des données de terrain. Cette démarche scientifique, fondée sur une méthodologie systématique de calibration et de validation, répond aux exigences actuelles de l'ingénierie des chaussées. Elle facilite une maintenance proactive des infrastructures et ouvre la voie à des stratégies de réhabilitation plus précises et économiquement viables, tout en approfondissant la compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux dans divers environnements.

7.4 Fichiers finaux

Les fichiers d'analyse pour le processus de calibration dans l'outil CAT sont disponibles en ligne dans le logiciel pour consultation et analyse :

- FC : Fatigue-Novembre
- O : Orniéage-Novembre
- FT : FT-Novembre
- IRI : IRI0Fev2025

8. QUANTIFICATION DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PERFORMANCE DES CHAUSSÉES AU QUÉBEC

Le sud du Québec est susceptible de se réchauffer d'au moins 3 °C d'ici la fin du 21^{ème} siècle (Gouvernement du Québec 2024). Les pluies de crue, celles ayant une forte intensité et une courte durée, vont également augmenter très fortement (GIEC, 2021). Les risques des effets des changements climatiques sur le réseau routier québécois ainsi que les stratégies qui permettront d'y faire face peuvent être quantifiés à travers des projections climatiques futures. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la réponse des chaussées souples au Québec. Elle s'appuie sur deux bases de données climatiques futures (RCP8.5 et RCP4.5) développées par l'Université McGill, décrites plus tôt dans ce rapport, plus précisément pour la période 1989-2069. Cinq principales entités physiques faisant partie du EICM et utilisées dans le logiciel AASHTOWare PMED ont été considérées: la température de l'air, le couvert nuageux, la vitesse du vent, l'humidité relative, et la précipitation. Un total de 81 fichiers *.nc par entité physique a été traité avec un code MATLAB afin de générer des fichiers *.hcd qui peuvent être utilisés dans le logiciel AASHTOWare PMED et le CAT. Similairement aux points qui peuvent être sélectionnés à partir de la base de données MERRA 2, présente par défaut dans le logiciel AASHTOWare PMED, chaque fichier *.hcd créé correspond à une station météorologique. L'objectif était de créer une liste de fichiers *.hcd couvrant la zone géographique du Québec où les chaussées monitorées par le MTMD se trouvent; cette zone géographique correspond au sud du Québec. Une résolution de 0,5 degrés en latitude et 0,625 degrés en longitude est utilisée pour créer la liste de fichiers *.hcd. Avec une telle résolution, similaire à celle utilisée par MERRA 2, un total de 38 points en longitude et 17 points en latitude sera obtenu; cela correspond à 646 fichiers *.hcd. Compte tenu de la durée de création d'un fichier *.hcd d'environ quatre heures, il était difficile de créer la totalité des 646 fichiers *.hcd. En collaboration avec les experts du MTMD, il a donc été décidé de sélectionner six sections de routes typiques et représentatives des conditions et pratiques (classe fonctionnelle, trafic, sols, région climatique) du Québec pour faire l'évaluation de l'effet des changements climatiques.

8.1 Critère de choix des stations météorologiques

Six stations climatiques ont été générées dans le logiciel AASHTOWare PMED afin de décrire d'une manière exhaustive le climat futur du Québec pour des secteurs précis où l'effet des changements climatiques sera étudié pour des sections choisies par l'équipe de recherche en accord avec les experts du MTMD. Les projets sélectionnés couvrent les quatre zones climatiques de la province de Québec. Ils considèrent également différents niveaux de trafic (DJMA) de faible à élevé. À noter que les projets faisant partie de la zone climatique 3 présentaient tous des niveaux de trafic faible. Les caractéristiques des projets sélectionnés pour la présentation du climat futur au Québec sont présentées au Tableau 56 en s'appuyant sur les ajustements préalablement proposés aux zones climatiques. Les emplacements géographiques des stations météorologiques ont été stockés dans un fichier « station.dat » incluant des informations sur les latitudes, longitudes, élévations et les intervalles du temps (1989-2069). Les différentes localisations des stations climatiques sont présentées dans la Figure 42. Pour chaque station météorologique, les valeurs horaires projetées de la température de l'air, du couvert nuageux, de la vitesse du vent, de l'humidité relative, et de la précipitation ont été fournies par l'Université McGill pour la période 1989-2069.

Tableau 56 : Caractéristiques des projets sélectionnés pour la présentation du climat futur au Québec

Projet	Long. (km)	Classe	Territoire	Trafic	RTSS	Zone clim.
Projet 14	2,75	20-Nationale	88 Laurentides-Lanaudière	Moyen	00117-03-092-000G	2
Projet 45	3,99	10-Autoroute	88 Laurentides-Lanaudière	Moyen	00050-03-020-000C	2
Projet 52	0,35	10-Autoroute	86 Montérégie	Moyen	00010-02-120-000G	1
Projet 266	1,41	20-Nationale	29 Communauté Métropolitaine de Montréal	Élevé	00132-03-110-000D	1
Projet 101	1,58	20-Nationale	65-Bas-St-Laurent	Faible	00132-20-312-000C	3
Projet 20	1,93	20-Nationale	68-Saguenay-Lac-St-Jean-Chibougamau	Moyen	00169-02-202-000C	4



Figure 42 : Emplacements des stations météorologiques

8.2 Évolution des paramètres climatiques sur un horizon de 80 ans

Il est connu que les paramètres climatiques tels que la température et la précipitation sont susceptibles de varier au fil des années. Le Tableau 57 présente leur évolution dans les prochains 80 ans selon les simulations des changements climatiques effectuées dans le cadre de ce projet. Ces statistiques reflètent les résultats des projections climatiques à insérer dans le logiciel AASHTOWare PMED pour les trois scénarios MERRA2 (le climat référence), RCP4.5 et RCP8.5. Ils permettront de détecter le ou les paramètres à l'origine du changement des performances des chaussées souples au Québec. Sur un horizon de 80 ans, les projections climatiques ont révélé:

- Une augmentation de la température, variant entre 2,7 et 5,6 °C (RCP comparés au climat de référence). À long terme, ceci aurait un impact sur les conditions hivernales au Québec du fait que les hivers seront marqués par l'adoucissement des températures. La diminution de la profondeur de gel serait également appréhendée.

- Une baisse des précipitations variant entre 48 et 260 mm (RCP comparés au climat de référence). En conséquence, les teneurs en eau dans les sols de chaussées ainsi que le niveau des nappes phréatiques pourraient diminuer à long terme.
- Une diminution de nombre de cycles gel-dégel sauf dans deux régions de la province du Québec sur six : Saguenay (projet 20) et Bas-St-Laurent (projet 101).
- Une diminution de l'indice de gel susceptible d'engendrer une diminution de la profondeur de gel.
- Une augmentation de la vitesse du vent (environ le double) et du couvert nuageux par rapport le climat de référence (Figure 43 et Figure 44).

Ce résultat est conforme avec plusieurs travaux de littérature. La précipitation est susceptible de fluctuer selon la région et la saison. En effet, elle devrait augmenter dans certaines régions et diminuer dans d'autres (Gouvernement du Canada, 2019; CarbonBrief,2018). Contrairement à la température, qui devrait augmenter partout et en toute saison, Une légère diminution des précipitations estivales est prévue sur de vastes régions du sud du Canada (Gouvernement du Canada, 2019). Aux États-Unis, Easterling et al. (2017) et Qioa et al. (2022) ont mené des recherches sur la variation des précipitations. Il s'est avéré que l'ouest, le sud-ouest et le sud-est des États-Unis ont connu une baisse des précipitations annuelles, tandis que les plaines du nord et du sud, le Midwest et le nord-est ont connu l'effet inverse.

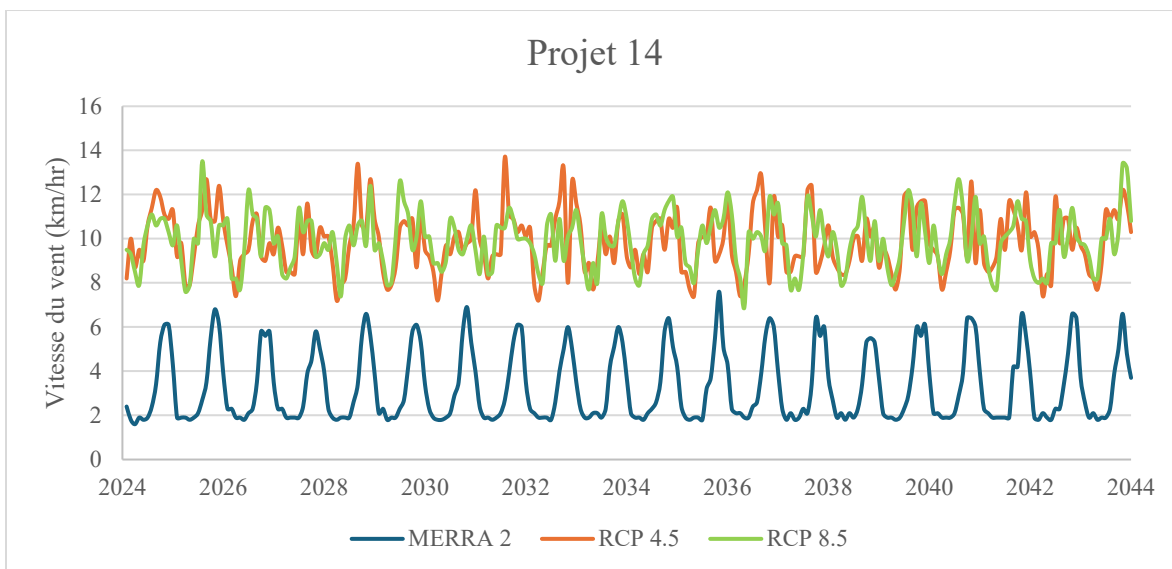


Figure 43 : Évolution de la vitesse du vent sur un horizon de 80 ans

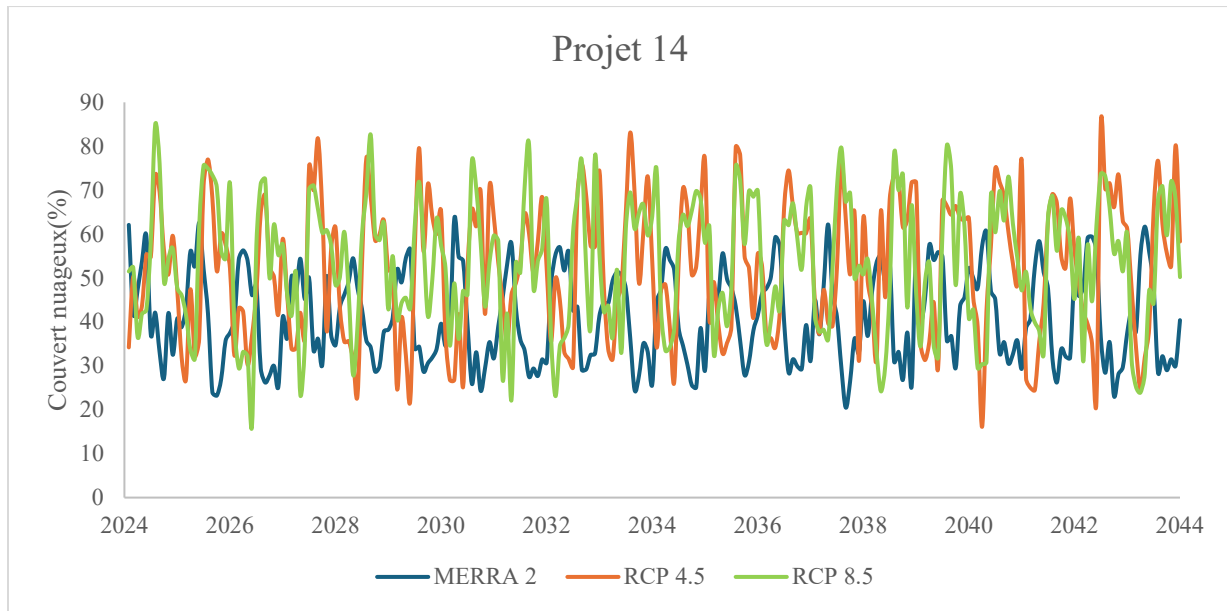


Figure 44 : Évolution du couvert nuageux sur un horizon de 80 ans

Tableau 57 : Évolution des valeurs climatiques en fonction des différents scénarios

Projet	Températures (°C)			Précipitation (mm)			Nb cycles gel-dégel			Indice de Gel (°C·jours)		
	MERRA 2	RCP 4.5	RCP 8.5	MERRA 2	RCP 4.5	RCP 8.5	MERRA 2	RCP 4.5	RCP 8.5	MERRA 2	RCP 4.5	RCP 8.5
14	3,4	6,9	7,0	1283,2	1214,6	1242,3	63,6	53,7	60,3	1456,1	717,4	693,1
20	2,8	6,5	6,6	1232,9	974,3	997,7	58,8	63,3	68,6	1651,1	845,0	808,0
45	6,2	8,9	9,0	1245,4	1100,3	1118,6	69,8	56,7	63,1	1012,0	522,0	485,8
52	6,9	9,8	7,4	1230,6	1182,4	1300,0	70,5	56,2	65,4	916,7	456,1	645,2
101	2,2	7,8	7,8	1169,7	1115,1	1128,8	51,6	53,2	58,6	1389,0	461,4	444,8
266	7,4	10,1	10,2	1216,7	1058,9	1144,8	70,2	51,8	58,0	863,7	407,2	373,8

8.3 Analyse de la fissuration longitudinale de fatigue sur un horizon de 80 ans

Les simulations au fil du temps jusqu'à l'an 2069 à l'aide des bases climatiques futures (RCP4.5 et RCP8.5) montrent une diminution de la fissuration longitudinale de fatigue des chaussées souples au Québec. Une réduction allant de 0,48 à 3,00 % a été observée par rapport au climat référence (MERRA 2) (Tableau 58). Sous le même scénario climatique, MERRA 2, RCP 4.5 ou RCP 8.5, les mesures entre les différents sites étaient également variables. Cela pourrait être attribué aux différences de niveau de trafic et de zone climatique d'un site à l'autre. À son tour, le scénario le plus pessimiste RCP 8.5 a généré des dommages identiques voire légèrement inférieures par rapport au scénario RCP 4.5.

La réduction de la fissuration longitudinale de fatigue sur un horizon de 80 ans pourrait s'expliquer non seulement par la diminution des précipitations mais également par la réduction de l'indice de gel et le nombre de cycles gel-dégel observés pour la province du Québec (Tableau 57, Tableau

53). Il est intéressant de noter que dans une étude similaire menée à l'échelle du Canada (Swarna 2021; Swarna et al., 2022), la même tendance pour la fissuration longitudinale de fatigue dans le futur a été rapportée. En effet, les auteurs ont constaté une augmentation de FC en moyenne de 12 % en raison du changement climatique sur tous les tronçons qu'ils ont considérés, sauf à Ottawa et à Québec. Ce résultat était justifié par le fait que ces deux provinces surestiment le trafic lors de la conception des chaussées, ce qui les rendent selon les auteurs plus adaptés au changement climatique. La même tendance décroissante de FC a été signalée pour le Québec dans l'étude de Mills et al. (2009). Une légère augmentation des fissures longitudinales a été signalée pour la plupart des sites, à l'exception de la Colombie-Britannique et du Québec. De même, Doré (2014) a associé l'augmentation de la fissuration longitudinale de fatigue à une augmentation des précipitations. En ce sens, la diminution de la fissuration longitudinale de fatigue, observée dans notre projet, pourrait être attribuée à la diminution des précipitations. Des températures plus élevées peuvent également induire des déformations plus élevées, mais également augmenter la résistance à la fatigue par la diminution de la rigidité du revêtement. En somme, l'évolution des variables climatiques estimée dans cette étude semble raisonnablement expliquer la réduction de la fissuration longitudinale de fatigue.

Tableau 58 : Évolution de la fissuration longitudinale de fatigue en fonction des différents scénarios climatiques

Projet	Endommagement à fiabilité spécifiée			
	Cible (%)	Prédit (%)		
		MERRA 2	RCP4.5	RCP8.5
14	25	4,99	3,97	3,99
20	25	5,95	3,83	3,81
45	25	7,52	5,38	5,35
52	25	10,65	8,2	7,62
101	25	3,75	3,27	3,25
266	25	4,95	3,52	3,53

8.4 Analyse de l'Orniérage sur un horizon de 80 ans

Sur un horizon de 80 ans, l'Orniérage des chaussées souples au Québec est susceptible de diminuer suite aux changements climatiques (Tableau 59). Les résultats des projections générées par les bases RCP 4.5 et RCP 8.5 étaient inférieurs à ceux du climat référence. Par exemple, le projet 14 a révélé un Orniérage total de 4,78 mm sous le scénario RCP 4.5 contre 8,29 mm pour le climat de référence. Le scénario le plus pessimiste a généré un Orniérage très proche de celui du scénario RCP 4.5.

Une telle observation concernant la tendance de l'Orniérage dans le futur pourrait être attribuable à la réduction de l'indice de gel et le nombre de cycle gel-dégel, la diminution des précipitations, l'augmentation de la vitesse du vent et de la couverture nuageuse. Ce résultat est conforme avec celui de Mills et al. (2009) : une réduction de 3 % dans l'orniérage total a été notée au Québec en utilisant le scénario Canadian Global Climate Model version 2 (CGCM2A2x). De même, dans les travaux de Swarna (2021) et Swarna et al. (2022), la diminution de l'Orniérage dans la couche de fondation et du sol support est attribuable à la réduction de l'indice de gel et du nombre des cycles

de gel. En se référant aux travaux de Doré et al. (2014), la diminution de l'orniérage est associée à la baisse des précipitations.

Des questions ont été soulevées sur l'influence d'autres facteurs sur la réponse des chaussées dans le futur, entre autres la vitesse du vent et le couvert nuageux, qui auront des effets sur la température de surface, affectant la rigidité du revêtement et le comportement mécanique de la structure. Ling et al. (2024), Qiao et al. (2020), Qin et Hiller (2013) et Shitara et al. (1973) ont discuté du refroidissement de la température à la surface des chaussées à la suite de l'augmentation de la vitesse du vent. Cette diminution peut provoquer une diminution de la température à la surface des chaussées entre 2 et 10 °C (Qin et Hiller, 2013). Également, le rôle du couvert nuageux dans la baisse de la température des chaussées a été examiné. En effet, les chaussées pourraient avoir tendance à se refroidir dans les zones où la couverture nuageuse augmentera considérablement dans le futur (Qiao, 2020); celle-ci pourrait compenser l'augmentation des températures. En ce sens, la diminution de l'Orniérage dans le futur pourrait être associée également, à la réduction de la température de pavage dans le futur.

Tableau 59 : Évolution de l'Orniérage en fonction des différents scénarios climatiques

Projet	Endommagement à fiabilité spécifiée			
	Cible (mm)	Prédit (mm)		
		MERRA 2	RCP4.5	RCP8.5
14	19	8,29	4,78	4,67
20	19	8,9	4	3,76
45	19	9,88	5,19	4,99
52	19	5,78	4,25	3,88
101	19	3,9	3,22	3,11
266	19	5,89	3,28	3,19

8.5 Analyse de l'IRI sur un horizon de 80 ans

Par rapport au climat de référence, l'Indice de Rugosité International a diminué sur un horizon de 80 ans (Tableau 60). Ceci pourrait être expliqué par l'augmentation des températures et la réduction de l'indice de gel ainsi que le nombre de cycles gel-dégel. Cela est également un résultat raisonnable compte tenu de la réduction anticipée de l'orniérage et de la fissuration longitudinale de fatigue. Ces résultats rejoignent également ce que révèlent certaines études ou modèles de la littérature, comme celle de Bizjak et al. (2014), Doré et al. (2014), Drolet (2015), Mills et al. (2009), Sylvestre et al. (2019) et Tighe et al. (2008) qui ont observé la même tendance décroissante pour l'IRI dans les provinces de Québec, Terre-Neuve et Labrador, en tenant compte de l'évolution de divers paramètres climatiques. Une autre explication de la baisse de l'IRI a été fournie par Rana et al. (2020). En effet, ceci pourrait être dû à la différence de performance au niveau du modèle d'IRI entre des zones soumises au gel et des zones non soumises au gel, considérée au niveau du facteur de site. Il est également possible de noter que le scénario le plus pessimiste a généré un IRI similaire à celui obtenu pour le scénario RCP4.5.

Tableau 60 : Évolution de l'IRI en fonction des différents scénarios climatiques

Projet	Endommagement à fiabilité spécifiée			
	Cible (m/km)	Prédit (m/km)		
		MERRA 2	RCP4.5	RCP8.5
14	2,7	2,28	2,16	2,16
20	2,7	2,29	2,13	2,13
45	2,7	9,88	5,19	4,99
52	2,7	2,31	2,23	2,24
101	2,7	2,14	2,08	2,08
266	2,7	2,19	2,1	2,1

8.6 Analyse de la Fissuration Transversale sur un horizon de 80 ans

Il est couramment connu que l'adoucissement des températures hivernales généré par l'augmentation des températures (Tableau 57) est bénéfique du point de vue de la Fissuration Transversale, car ce paramètre de performance est principalement influencé par la température du revêtement. Les travaux de littérature ont révélé une nette amélioration de la réponse des chaussées souples au retrait thermique dans le futur (Swarna 202; Swarna et al., 2022). Dans ce projet, les mesures restaient constantes sur tous les sites, et ceci sous les trois scénarios climatiques (Tableau 61). Une valeur de 40,97 m/km a été enregistrée. Tel que discuté précédemment, cela est principalement attribuable au modèle de performance qui semble mal adapté pour la prédiction dans le contexte du Québec. Il est également pertinent de rapporter que l'observation des mesures constantes sous le même scénario climatique pour les différents sites est cohérente avec les conclusions de Mills et al. (2009).

Tableau 61 : Évolution de la Fissuration Transversale en fonction des différents scénarios climatiques

Projet	Endommagement à fiabilité spécifiée			
	Cible (m/km)	Prédit (m/km)		
		MERRA 2	RCP4.5	RCP8.5
14	189,40	40,97	40,97	40,97
20	189,40	40,97	40,97	40,97
45	189,40	40,97	40,97	40,97
52	189,40	40,97	40,97	40,97
101	189,40	40,97	40,97	40,97
266	189,40	40,97	40,97	40,97

9. CONCLUSIONS

Le présent rapport vise à améliorer la prédictibilité des performances des chaussées souples de la province de Québec en utilisant le logiciel AASTHOWare PMED. Un étalonnage local à l'aide du CAT a été entrepris à cette fin. Les modèles de performance incluaient la fissuration longitudinale de fatigue (FC), l'Orniérage (O), la Fissuration Transversale (FT) et l'Indice de Rugosité Internationale (IRI). Au total, 353 chaussées souples sous la gestion du ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) ont été initialement retenues selon plusieurs critères. À la suite d'un processus approfondi d'analyse des informations pour chaque section, un échantillon composé de 107, 192, 80 et 183 sections de référence, pour la FC, l'O, la FT et l'IRI a été retenu pour la calibration locale. Les données requises ont été principalement collectées à partir des informations provenant de différents guides pratiques, telles que AASHTO (2010, 2020a) et CAT user guide (2020) ainsi que l'expérience et les informations recueillies par le MTMD au cours des dernières années, telles que Doucet et Auger (2012, 2014) et Houimli et al. (2017). Les propriétés des matériaux des sections de référence ont été établies afin d'attribuer des caractéristiques pouvant être considérées comme représentatives pour la province de Québec. Un logiciel d'aide a été développé par l'équipe de recherche et livré au MTMD afin de visualiser de manière simple les paramètres de chaque section et de rendre plus accessible et plus cohérent le filtrage des sections non représentatives ou indésirables.

Des mesures statistiques (biais, erreur-type, coefficient de détermination et p-valeur), ainsi que du jugement technique, ont été exploitées en vue d'évaluer la qualité de l'étalonnage local spécifique aux conditions du Québec. Une meilleure prédiction de la performance des sections de chaussée a été obtenue sur la base de l'adéquation entre les résultats d'étalonnage locaux et globaux. La synthèse des coefficients d'étalonnage locaux est présentée au Tableau 51. Les principaux constats sont les suivants :

- Des données concentrées sur l'axe des abscisses et ordonnées ont été observées lors de l'étalonnage global de la FC. Une nette amélioration de la dispersion des données autour de la ligne d'égalité a été observée à l'issue de l'étalonnage local. En admettant que les deux catégories de fissurations (par le bas et par le haut) ont été fusionnées lors de l'analyse, leur effet sur les résultats de l'étalonnage reste néanmoins à discuter. Malgré la considération de la fissuration par le haut et la fissuration par le bas séparément dans plusieurs tentatives d'optimisation dans l'outil CAT, les mêmes résultats pour la Fissuration par le bas ont été rapportés (Gong et al., 2017; Idaho Transportation Department, 2018). De même, l'étalonnage local de la Fissuration par le haut n'a pas apporté des réponses satisfaisantes en termes de prédictions des conditions de plusieurs régions (Idaho Transportation Department, 2018; National Center for Asphalt Technology, 2017).
- En utilisant les coefficients globaux, l'outil CAT a surestimé l'Orniérage des chaussées souples du réseau routier québécois. Lors de l'étalonnage local, les scénarios les plus optimaux impliquaient à la fois les coefficients β_{s1} (fondation) et β_{s1} (sol support).
- En raison du modèle de prédiction de la FT présent dans le logiciel AASTHOWare PMED, des prédictions nulles ont été générées. La non-adéquation de la relation de K_t développée au cours des efforts d'étalonnage globaux aux conditions de Québec a été mis en avant pour expliquer de tel résultat. Des efforts futurs pour développer un nouveau modèle d'endommagement spécifiques aux conditions locales du Québec sont recommandés.
- La corrélation entre les mesures réelles et prédites dans le cas de l'IRI a révélé un biais et une erreur-type faibles lors de la calibration globale. Des affinements supplémentaires aux coefficients d'étalonnage ont été apportés afin d'optimiser principalement la p-valeur. La

condition de l'hypothèse nulle a été satisfaite pour une p-valeur de 0,99. Il est à noter qu'une valeur d'IRI initial a été définie pour chaque projet retenu lors de l'étalonnage local du modèle de prédiction de l'IRI au lieu de la valeur de 1, définie par défaut dans le logiciel AASHTOWare. Suite aux travaux de recherche menés par l'Ontario (Yan et al., 2017), une suggestion d'unifier la valeur d'IRI initial dans la conception future plutôt que spécifique à un projet était recommandée. La valeur à suggérer dépend des spécifications des agences routières pour l'IRI. Néanmoins, cette démarche risque de sous-estimer la variabilité des résidus (différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites) et surestimer la fiabilité du dimensionnement.

En s'appuyant sur les lois d'endommagement calibrées aux conditions locales du Québec, la dernière évaluation du projet a consisté à quantifier l'impact des changements climatiques sur la performance des chaussées souples sur un horizon de 80 ans (1989–2069). L'objectif principal était de comparer les prévisions des modèles de performance aux conditions climatiques de référence de 1989.

Pour ce faire, un ensemble complet de données développé par l'Université McGill a été exploité en considérant cinq entités physiques essentielles : la température de l'air, la couverture nuageuse, la vitesse du vent, l'humidité relative et les précipitations. Les coefficients d'étalonnage locaux, préalablement ajustés pour refléter le contexte québécois, ont été utilisés pour évaluer la performance des chaussées pour deux périodes distinctes.

Outre la base climatique par défaut du modèle Modern Era Retrospective Reanalysis 2 (MERRA2) intégrée au logiciel AASTOWare PMED, deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été considérés : le RCP4.5 (scénario de stabilisation) et le RCP8.5 (scénario pessimiste). Ces scénarios permettent d'appréhender l'impact des changements climatiques, non seulement sur les variables telles que les températures, les précipitations, le nombre de cycles gel-dégel et l'indice de gel, mais également sur les indicateurs de performance, particulièrement dans les différentes zones climatiques du Québec.

Des fichiers *.hcd ont été générés à l'aide du logiciel MATLAB pour les scénarios futurs RCP4.5 et RCP8.5, et six stations ont été sélectionnées afin de représenter les conditions climatiques futures dans le logiciel AASHTOWare PMED. Les projets évalués, qui couvrent l'ensemble des quatre zones climatiques du Québec (zones 1, 2, 3 et 4) et intègrent divers niveaux de trafic (de faible à élevé), ont ainsi permis d'intégrer les fichiers climatiques synthétiques dans le logiciel AASTOWare PMED pour évaluer l'effet des changements climatiques.

Sur un horizon de 80 ans, les conditions climatiques devraient évoluer considérablement, en particulier le climat hivernal. Dans le sud du Québec, l'augmentation des températures pourrait causer des hivers plus doux, accompagnée d'une diminution du nombre de cycles gel-dégel et de l'indice de gel, ce qui pourrait avoir un impact potentiellement positif sur les chaussées souples. Aussi, les précipitations hivernales devraient diminuer pour les sites étudiés. Selon plusieurs études (Carbon Brief, 2018; Esterling et al., 2027; Gouvernement du Canada, 2019; Qioa et al., 2022), les tendances futures en matière de précipitations varieront selon la région et la saison, avec des augmentations ou diminutions possibles selon l'emplacement géographique.

En termes des modèles de prédiction, une réduction de la FC, l'O et l'IRI des chaussées souples au Québec sera observée à long terme. Cette amélioration pourrait s'expliquer par :

- FC: La diminution des précipitations et la réduction de l'indice de gel et du nombre de cycles gel-dégel.

- O: La réduction de l'indice de gel et du nombre de cycle gel-dégel, la diminution des précipitations, l'augmentation de la vitesse du vent et l'augmentation de la couverture nuageuse.
- FT: L'augmentation des températures et la réduction de l'indice de gel et du nombre de cycles gel-dégel.

Parmi les pistes de recherches futures identifiées dans ce travail de recherche, il est possible de mentionner les éléments suivants :

- Bien qu'il ait été possible de calibrer la loi d'endommagement pour la fissuration longitudinale en piste de roues, il a été noté que la représentativité du modèle est limitée. Un modèle adapté, davantage capable de capturer la performance des chaussées au Québec, apparaît requis.
- Comme le modèle d'endommagement pour la fissuration transversale s'est avéré non adéquat, une étude détaillée permettant de l'ajuster ou d'en définir un nouveau doit être considérée.
- L'évaluation de l'effet des changements climatiques ne permet pas de quantifier l'impact des événements extrêmes, mais plutôt celui des grandes tendances climatiques. Il apparaît pertinent d'évaluer spécifiquement, dans le cadre d'un futur projet, l'impact d'événements climatiques extraordinaires sur les chaussées souples et de quantifier la résilience des infrastructures routières.

10. RÉFÉRENCES

- AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- AASHTO. *Guide for the local calibration of the mechanistic-empirical pavement design guide*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- AASHTO. *AASHTOWare Pavement M-E Design v2.0 Help Manual*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- AASHTO. *AASHTOWare Calibrator User Manual (v.1.0)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019.
- AASHTO. *AASHTOWare Calibration Assistance Tool User Guide (v.2020.1)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- AASHTO. *Mechanistic-empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice* (3rd ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020a.
- AASHTO. *Top-down cracking enhancement to the MEPDG, 3rd edition manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020b.
- AASHTO PMED. *WEBINAR: Using the Calibration assistance tool for local calibration*, 2020.
- BERNARD, France et BRODEUR, Michel. *Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles*. Transports Québec, Service de la qualité et des normes, 2002. <http://www4.bnquebec.ca/pgq/2003/2607704.pdf>
- BILODEAU, Jean Pascal, DROLET, François Perron, DORÉ, Guy et SOTTILE, Marie France. « Effect of Climate Changes Expected during Winter on Pavement Performance », *Cold Regions Engineering*, 2015, 617–628. <https://doi.org/10.1061/9780784479315.054>
- BIZJAK, Karmen Fifer, DAWSON, Andrew, HOFF, Inge, MAKKONEN, Lasse, YIHAI, Jussi S et CARRERA, Alessandra. « The impact of climate change on the European road network », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, may 2014. <https://doi.org/10.1680/tran.11.00072>
- BNQ. *BNQ 2560-114: Travaux de génie civil—Granulats*. Bureau de normalisation du Québec, 2002a.
- BNQ. *BNQ 2560-600: Granulats—Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques—Classification et caractéristiques*. Bureau de normalisation du Québec, 2002b.
- BOONE, Jonathan. *Comparison of Ontario Pavement Designs Using the AASHTO 1993 Empirical Method and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Method*, Thèse de doctorat à l'Université de Waterloo, novembre 2013. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/8047>
- BROWN, Casey, GHILE, Yonas, LAVERTY, Mikaela et LI, Ke. « Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector », *Water Resources Research*, vol. 48, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011WR011212>
- BROWN, Ross D. « Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948–2005 », *Hydrological Processes*, vol. 24, june 2010. <https://doi.org/10.1002/hyp.7565>
- CARBONBRIEF. *Climate Modeling, explainer: What climate models tell us about future rainfall [En ligne]*. [<https://www.carbonbrief.org/explainer-what-climate-models-tell-us-about-future-rainfall/>] (19 janvier 2018)
- CHAUMONT, Diane et BROWN, Ross D. *Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le sud du québec*, Revue Routes - Road, 345, premier trimestre 2010, 78–83.p.
- CHRISTENSEN, Jens Hesselbjerg, HEWITSON, Bruce, BUSUIOC, Aristita, CHEN, Anthony, GAO, Xuejie, HELD, Isaac, JONES, Richard, KOLLI, Rupa Kumar, KWON, Won-Tae, LAPRISE, René, MAGANA, Victor, MEARN, Linda, MENENDEZ, Claudio Guillermo,

- RAISANEN, Jouni, RINKE, Annette, SARR, Abdoulaye et WHETTON, Penny. *Regional Climate Projections. Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), p. 94). Cambridge University Press.
- DORÉ, Guy et ZUBECK, Hannele K. *Cold regions pavement engineering*. ASCE Press ; McGraw-Hill, 2009.
- DORÉ, Guy, BILODEAU, Jean Pascal, THIAM, Papa Masseck et DROLET, François Perron. Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers Québécois, *Université Laval*, juin 2014.
- DOUCET, Félix. « Module complexe des enrobés et module réversible des matériaux granulaires pour le dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées au Québec », *Congrès de l'Association des transports du Canada, Montréal*, Québec, 2014.
- DOUCET, Félix et AUGER, Bruno. *Complex modulus determination of asphalt mixes at the Ministère Des Transports Du Québec*, Rep. No. RTQ-10-01, Ministère des Transports du Québec, Direction du laboratoire des chaussées, Service des matériaux d'infrastructures, 2012.
- DOUCET, Félix et AUGER, Bruno. *Détermination du module réversible des matériaux granulaires au ministère des Transports du Québec*, Gouvernement du Québec, Ministère des Transports du Québec, 2014.
- DROLET, François Perron. *Effets des changements climatiques sur la performance à long terme des chaussées souples au Québec Volet 2: Effet de l'augmentation de la température en hiver et d'une hausse du nombre d'épisode de redoux hivernaux*, Maîtrise en génie civil, Université Laval, 2015.
- EASTERLING, D. R., Kunkel, K. E., Arnold, J. R., Knutson, T. R., LeGrande, A. N., Leung, L. R., Vose, R. S., Waliser, D. E., & Wehner, M. (2017). Precipitation change in the United States. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, I*, 207–230
- FHWA. *Characterizing Existing Asphalt Concrete Layer Damage for Mechanistic Pavement Rehabilitation Design* (Technical Report FHWA-HRT-17-059). Federal Highway Administration, 2018.
- GIEC. *Le premier rapport du sixième cycle d'évaluation*. Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2021.
- GONG, Hongren, HUANG, Baoshan, SHU, Xiang et UDEH, Sampson. « Local calibration of the fatigue cracking models in the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Tennessee », *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18(sup3), 2017, p. 130–138. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1329868>
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. (2024). Portraits régionaux des défis, des perspectives d'adaptation aux changements climatiques et des perspectives d'atténuation. <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-economie-verte/actions-lutter-contre-changements-climatiques/portraits-regionaux>
- GOVERNEMENT DU CANADA. *Changement dans les précipitations* [En ligne] [<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/tendances-projections/changements-precipitations.html>] (avril 2019)
- GUDIPUDI, Padmini P, UNDERWOOD, B. Shane et ZALGHOUT, Ali. « Impact of climate change on pavement structural performance in the United States », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, October 2017, p.172–184. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.022>
- HALL, Kevin. D, XIAO, Danny. X et WANG, Kelvin. C. P. « Calibration of the MEPDG for flexible pavement design in Arkansas », *Transportation Research Record, Transportation*

- Research Board, National Research Council, Washington, D.C*, vol. 2226 January 2011, p. 135-141.
- HOUIMLI, Oussama, Saint Laurent, Denis et Roby, Julie. *Traitement des données de trafic pour une utilisation avec le MEPDG* [Final]. Ministère des Transports du Québec, 2017.
- HUANG, Yang. H. *Pavement analysis and design*, 2nd ed., Pearson/Prentice Hall, 2004.
- Idaho Transportation. *Calibration of the AASHTOWare Pavement ME Design Software for PCC Pavements in Idaho*, 2019, 122.p.
- INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT. [En ligne]. <https://irda.qc.ca/fr/outils/donnees-pedologiques-sols/cartes-pedologiques-quebec-irda/>
- KNOTT, Jayne F, JACOBS, Jennifer M, SIAS, Jo E, KIRSHEN, Paul et DAVE, Eshan V. A. « Framework for Introducing Climate-Change Adaptation in Pavement Management », *Sustainability*, vol. 11, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11164382>
- LADANY, Branko. *Conception et réhabilitation des infrastructures de transports en régions nordiques*. Études et recherches en transports (Rapport RTQ-94-07, Gouvernement du Québec, Ministère des Transports, 1996, 123.p.
- LEPAGE, Marie Pier, BOURDAGES, Line, BOURGEOIS, Gaétan. *Interprétation des scénarios de changements climatiques afin d'améliorer la gestion des risques pour l'agriculture*, Consortium de recherche & Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2012. <http://www.deslibris.ca/ID/233041>
- LING, Jianming, XING, Xinyuan, ZHANG, Jie et LIU, Shifu. « An Experimental Validation-Based Study of Airport Pavement Icing Mechanisms in Saline Environments and the Development of a Simplified Prediction Model », *Journal of Applied Science*, vol. 14, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14198867>
- LYTTO, Robert L., LUO, Xue, LING, Meng, CHEN, Yu, HU, Sheng et GU, Fan. *A Mechanistic Empirical Model for Top Down Cracking of Asphalt Pavements Layers*, NCHRP Project 01-52 (No. 257), National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, 2018.
- MAADANI, Omran, SHAFIEE, Mohammad et EGOROV, Igor. « Climate Change Challenges for Flexible Pavement in Canada: An Overview », *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 35, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000262)
- MARTINEAU, Bernard. *Traitement des données de circulation avec TrafLoad en vue de leur insertion dans le modèle MEPDG*. Ministère des Transports du Québec, Direction du laboratoire des chaussées, 2012.
- MILLS, Brian N, TIGHE, Susan L, ANDREY, Jean, Smith, James T et Huen, Ken. « Climate Change Implications for Flexible Pavement Design and Performance in Southern Canada », *Journal of Transportation Engineering*, vol. 135, 2009, p. 773-782.
- MONIZ, Carl, Pascale, Pierre, PLEAU, Richard et JUNEAU, Sylvain. *Détermination de la performance en laboratoire de matériaux recyclés utilisés en fondation routière* (Rapport Final Projet R672.1). Ministère des Transports du Québec, 2013.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DES FORÊTS. *Système d'information Géominière du Québec*. [En ligne]. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1102_indexAccueil?l=F
- MTMD. *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers*. Ministère des Transports du Québec, 2013.
- MTMD. *Structures de chaussée* [Norme]. Ministère des Transports du Québec, 2015.
- MTMD. *Choix des composants – enrobés: Norme 4202*. Ministère des Transports du Québec, 2018.
- MTMD. *Norme 4201 – Enrobés à chaud formulés selon le principe de la méthode Marshall. Tome VII – Matériaux* [En ligne]. <https://www.transports.gouv.qc.ca/normes/tome-vii/4201> (1995).

- MTMD. *Norme 4202 – Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées. Tome VII – Matériaux* [En ligne]. <https://www.transports.gouv.qc.ca/normes/tome-vii/4202> (2008).
- NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. (2017). *Pavement ME Design – A summary of local calibration efforts for flexible pavements* (Report No. 17-07). Auburn University.
- NCHRP. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Final Report NCHRP Report 01-37A. Transportation Research Board, 2004.
- Ontario Ministry of Transportation. *Ontario's Default Parameters for AASHTOWare Pavement ME Design*, Interim Report. 2014, Downsview, ON: Ontario Ministry of Transportation, Pavement and Foundations Section, Materials Engineering and Research Office, 2014.
- Ouranos. *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques: Guide destiné au milieu municipal québécois*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, 2010, p. 48.
- PAQUET, Christine. *Traitement préliminaire des données de trafic lourd avec Trafload en prévision du MEPDG*, (Final Dossier no 691(046)08). Ministère des Transports du Québec, 2009.
- PARADIS, Michel. « Les enrobés du MTQ et leurs usages en milieu municipal », Congrès INFRA 2015 – CERIU, Québec, QC, 2015.
- PLUMMER, D. A., CAYA, Daniel, FRIGON, Anne, COTÉ, Hélène, GIGUÈRE, M, PAQUIN, Dominique, BENER, Sébastien, HARVEY, Richard, et ELIA, R. de. « Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM », *Journal of Climate*, vol. 19, 2006, p. 3112–3132. <https://doi.org/10.1175/JCLI3769.1>
- QIAO, Yaning. *Flexible pavements and climate change: Impact of climate change on the performance, maintenance, and life-cycle costs of flexible pavements*, 2015. <http://eprints.nottingham.ac.uk/29582/>
- QIAO, Yaning, DAWSON, Andrew R, PARRY, Tony, FLINTSCH, Gerardo et WANG, Wenshun. « Flexible Pavements and Climate Change: A Comprehensive Review and Implications », *Sustainability*, vol. 12, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12031057>
- QIAO, Yaning, GUO, Yaru, STONER, Anne M.K. et SANTOS, Joao. « Impacts of future climate change on flexible road pavement economics: A life cycle costs analysis of 24 case studies across the United States », *Sustainable Cities and Society*, vol. 80, May 2022, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103773>
- QIN Yinghong et Hiller Jacob. E. (2013). « Ways of formulating wind speed in heat convection significantly influencing pavement temperature prediction », *Heat Mass Transfer*, vol. 49, 2013, p. 745–752.
- RANA, Masud, SWARNA, Surya Teja et HOSSAIN, Kamal. « Climate Change Impact on Pavement Performance in Newfoundland, Canada », *99th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB) of National Academies of Science and Engineering, Washington DC, USA*, 2020.
- SAHA, Jhuma, NASSIRI, Somayeh, BAYAT, Alireza, et SOLEYMANI, Hamid. « Evaluation of the effects of Canadian climate conditions on the MEPDG predictions for flexible pavement performance », *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, 2012, p. 392–401. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.752488>
- SCHWARTZ, Charles W., LI, Rui, KIM, Sung, CEYLAN, Halil et GOPALAKRISHNAN, Kasthurirangan. *Sensitivity evaluation of MEPDG performance prediction*. Contractor's Final Report of National Cooperative Highway Research Program 1-47, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 2011.

- SHITARA, Hirushi, HOSOKAWA, Koya, ISHIKAWA, Isao, KIKUCHI, Ritsu, MAKITA, Hajime, SASAKI, Yuji. *On the micro-scale distribution of the nocturnal cooling in a small basin*. Sci. Rep. Tohoku Univ. 7th, ser. 23, 1973, 163-185.p.
- ST-LAURENT, Denis. *CHAUSSÉE 2: Logiciel de dimensionnement des chaussées souples (2.0)* [Computer software]. Ministère des Transports du Québec: Direction des chaussées, 2006a.
- ST-LAURENT, D. *Dimensionnement des chaussées souples: Recueil abrégé de paramètres de conception*. Ministère des Transports du Québec, 2006b.
- SWARNA, Surya Teja. Influence of Climate Change on Pavement Design and Materials in Canada, *Ph.D thesis*, Memorial University of Newfoundland, 2021.
- SWARNA, Surya Teja, HOSSAIN, Kamal, MEHTA, Yusuf A. et BERNIER, Alyssa. « Climate Change Adaptation Strategies for Canadian Asphalt Pavements; Part 1: Adaptation strategies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 363, 2022.
- SYLVESTRE, Olivier, BILODEAU, Jean Pascal et DORÉ, Guy. « Effect of frost heave on long-term roughness deterioration of flexible pavement structures », *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, 2019, p. 704–713. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326598>
- TAC-ATC. *Canadian Guide: Default Parameters for AASHTOWare Pavement ME Design*. Transportation Association of Canada, 2020.
- TANER, Mehmet Ümit, RAY, Patrick et BROWN, Casey. « Robustness-based evaluation of hydropower infrastructure design under climate change », *Climate Risk Management*, vol. 18, 2017, p. 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.08.002>
- THIAM, Papa Masseck. *Effets des futurs changements climatiques sur la performance à long terme des chaussées souples au Québec*, Maîtrise en génie civil, Université Laval, 2014.
- THIAM, Papa Masseck, DORÉ, GUY et BILODEAU, Jean Pascal. « Effect of the future increases of precipitation on the long-term performance of roads », *Proceedings Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, vol. 10, 2013.
- TIGHE, Susan L., SMITH, James, MILLS, Brian et ANDREY, Jean. « Evaluating Climate Change Impact on Low- Volume Roads in Southern Canada on Low-Volume Roads in Southern Canada », vol. 2053, October 2015, p. 9-16. <https://doi.org/10.3141/2053-02>
- UNIVERSITÉ LAVAL. *Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples: I3C-me (Version 2)* [Computer software]. Université Laval, 2019.
- VINCENT, Lucie A. et MEKIS, Éva. « Changes in Daily and Extreme Temperature and Precipitation Indices for Canada over the Twentieth Century. *Atmosphere-Ocean* », vol. 44, 2006, p. 177–193. <https://doi.org/10.3137/ao.440205>
- WARREN, Fiona J. et Lemmen, Donald S. *Canada in a changing climate: Sector perspectives on impacts and adaptation*. Natural Resources Canada, 2014. <https://www.deslibris.ca/ID/243577>
- YUAN, Xian.X., LEE, Warren, et LI, Ningyuan. « Ontario's local calibration of the MEPDG distress and performance models for flexible road: a summary ». *TAC Conference and Exhibition, St. John's, NL*, 2017.

ANNEXE A

*ASSESSMENT OF THE VALIDITY OF THE PAVEMENT-RELATED CLIMATIC
ZONES IN A CHANGING CLIMATE USING HIGH-RESOLUTION CLIMATE
SIMULATIONS*

A.1 Introduction

The performance of pavement infrastructure is highly dependent on various climatic variables such as temperature, precipitation, humidity, cloud cover and wind speed. More specifically, they influence the pavement design parameters, deterioration rate and rehabilitation strategies (Qiao et al, 2020). To account for the spatio-temporal variations in the climate factors, pavement design and management guidelines generally define climatic zones. For example, Fig. 1 shows the pavement-related climatic zones defined by the Ministère des Transports du Québec (MTQ) that is used for recommending pavement class and associated materials and components.

Future changes to pavement-relevant climate variables in a warmer climate can impact the performance of existing pavements as they have been designed based on historical climatic loads. It is therefore crucial to adapt pavement design and management parameters to make them climate resilient.

This report provides a summary of the high-resolution climate change simulations and diagnostics developed for southern Quebec as part of the MTQ project focussed on the calibration of the AASHTO software. This project is led by Prof. Guy Doré and his team, and the climate change simulations and diagnostics were developed by the team led by Prof. Laxmi Sushama at McGill University. The main deliverable of the McGill team is to assess the validity of the zones established by MTQ for pavement design in the context of a changing climate and to provide climate change information for the 1989–2070 period, corresponding to RCP8.5 scenario, for running the pavement model.

A.2 Climate models and simulations

The project makes use of existing regional climate model (RCM) simulations, with resolutions varying from 25 km to 50 km, as well as some newly developed ultra-high resolution simulations. The ultra-high resolution simulation that is currently being developed is discussed first followed by details of the existing simulations.

Most of the RCM uncertainties are related to the model resolution as they are insufficient to describe many important small-scale processes (such as convective cloud systems) that rarely extend beyond a few kilometres. These processes are approximated using simplified formulae known as parameterizations for relatively coarse grid box which is considered as the main source of errors and uncertainties in climate simulations (Palmer, 2014). Ultra-high resolution simulations which allow major convective cloud systems and other small-scale processes to be resolved explicitly are therefore termed as convection-permitting climate model simulations. Such simulations are able to generate climate information at fine spatial and temporal scales which are required for many engineering applications and climate change adaptation strategies.

For this project, ultra-high resolution convection-permitting simulations are developed using the limited area version of the Global Environmental Multiscale (GEM) model (Côté et al.,

1998), that is used by Environment and Climate Change Canada for Numerical Weather Prediction. More details about the model can be found in Diro and Sushama (2019).

First, GEM simulation at 4 km resolution, driven by ECMWF’s ERA5, for the 1989– 2010 period is performed for validation by comparing with available gridded and station observations. This simulation will be referred to as GEM4_ERA5 hereafter. Secondly, climate change simulations spanning the 1989–2070 period at 4 km resolution for Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 scenario is performed (RCP8.5 corresponds to the highest greenhouse gas emissions scenario and does not include any specific climate mitigation target, leading to a radiative forcing of 8.5 W/m² at the end of 21st century [Riahi et al., 2011]). To this end, GEM dynamically downscales a single member of an initial condition ensemble of the Second-Generation Canadian Earth System Model (CanESM2) over the outer 10 km resolution domain shown in Fig. 1; the outputs of this 10 km GEM simulation is then used as lateral boundary conditions for the ultra-high resolution GEM simulation over the inner domain at 4 km horizontal resolution. These two simulations will be referred to as GEM10_CanESM2 and GEM4_CanESM2. The complete list of the new GEM simulations considered in this study are summarized in Table 1. It must be noted that the first two years of all simulations are considered as spin-up years and therefore are not included in the analysis.

Table 1 List of GEM simulations at convection permitting resolution

Simulation	Driving Data	Period	Horizontal resolution
GEM4_ERA5	ERA5	1989-2010	4 km
GEM10_CanESM2	CanESM2	1989-2070	10 km
GEM4_CanESM2	GEM10	1989-2070	4 km

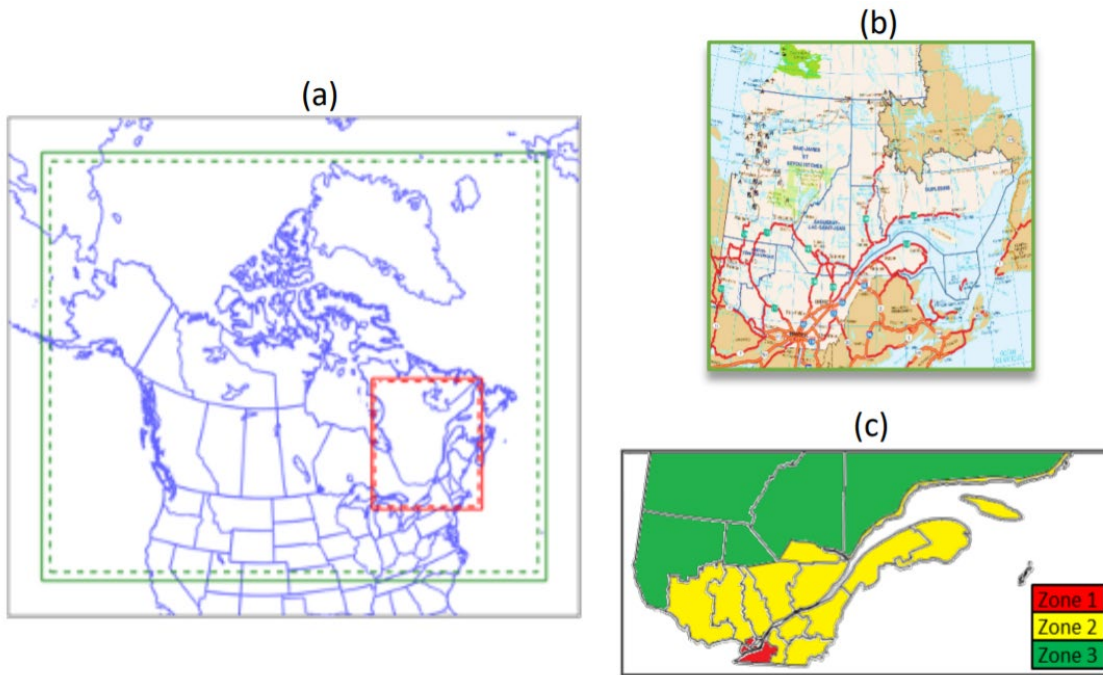


Figure 1: (a) Grid telescoping into Quebec for convection permitting transient climate change simulations at 4 km resolution (inner grid in red); The outer grid in green is the 10 km resolution

grid; (b) Main road network in Quebec, with the federal highways shown in orange and local highways in red (source: MTQ); (c) The pavement-related climatic zones defined by (source: MTQ).

The existing regional climate model simulations considered include:

- a. A reanalysis-driven (i.e., ERA Interim; Dee et al., 2011) GEM simulation and two 5-member transient climate change ensembles driven by five different members of a CanESM2 ensemble corresponding to RCP8.5 scenario; all simulations were performed at 50 km resolution.
- b. Simulations from the World Climate Research Program (WCRP) sponsored Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) corresponding to RCP8.5 scenario; Although several models contributed to CORDEX, a selected number of models and simulations are considered for this project. The choice was primarily based on the resolution; Simulations at the highest 0.22° resolution are considered. Furthermore, simulations that were driven by different GCMs were also selected to better quantify the uncertainties; these were primarily contributed to CORDEX by the Ouranos consortium.

Table 2 provides the complete list of existing RCM simulations discussed above.

Table 2 List of existing RCMs simulations considered in the study

Model	Driving Data	Abbreviation	Horizontal resolution
CanRCM4 (CCCma)	CanESM2	CanRCM4_CanESM2	25 km
CRCM5 (UQAM)	CanESM2	CRCM5_UQAM_CanESM2	25 km
CRCM5 (Ouranos)	CanESM2	CRCM5_OUR_CanESM2	25 km
	MPI-ESM-LR	CRCM5_OUR_MPI	25 km
	GFDL-ESM2M	CRCM5_OUR_GFDL	25 km
GEM (McGill)	CanESM2	GEM50_CanESM2	50 km
	ERA-Interim	GEM50-ERA	50 km

A.3 Validation

The GEM model has been applied in many previous studies, over several domains and has shown to reproduce climate characteristics reasonably well (e.g. Teufel and Sushama, 2019, Dukhan and Sushama, 2021 and Zhao and Sushama, 2020). Since the main focus of this study is to assess the validity of existing pavement-related climatic zones defined by MTQ in a changing climate, GEM4_ERA5 simulated 2m temperature and freezing index, which were found to have the largest effect on pavement performance among all climate variables based on a sensitivity test (personal communication), are compared with ERA5 and DayMet in Fig. 2.

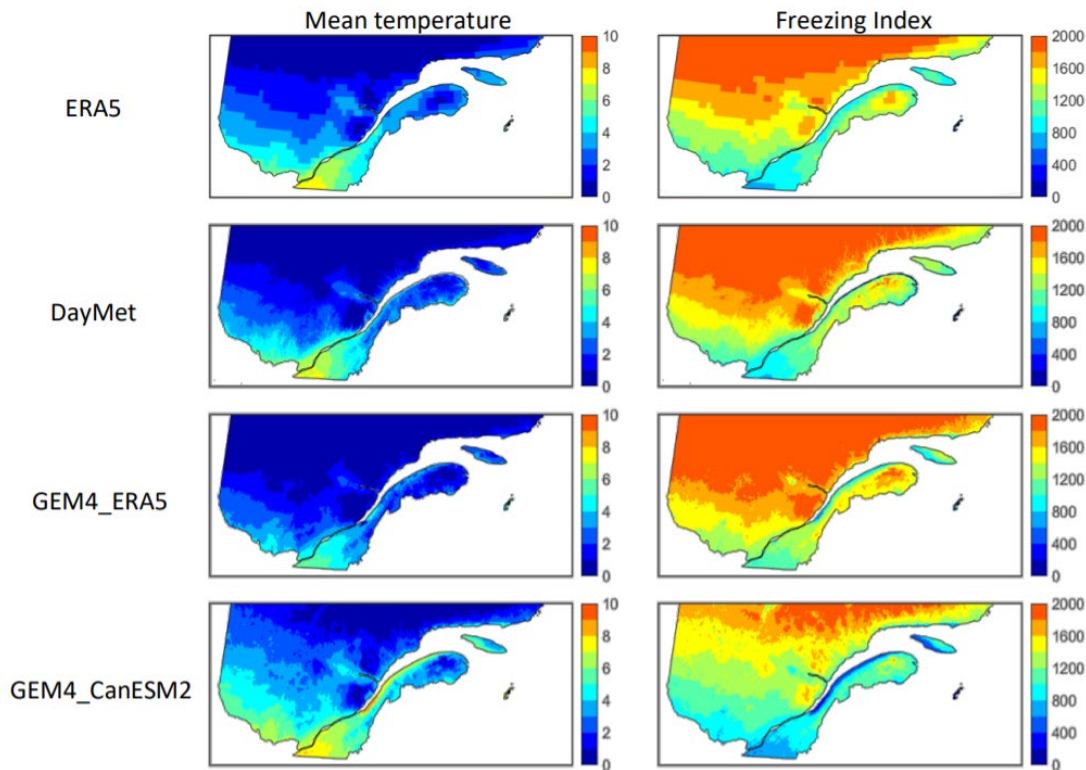


Figure 2: Mean annual temperature and freezing index obtained from ERA5, DayMet, GEM4_ERA5 and GEM4_CanESM2 simulations for the 1991–2020 period. GEM4_ERA5 is currently available only for the 1989–2010 period.

ERA5 is available at 30 km resolution, while DayMet has a resolution of 1 km. The DayMet data is closer to the model resolution and can therefore be considered to be more suitable for validation. GEM4_ERA5 shows quite similar patterns of mean temperature and freezing index with those of DayMet, suggesting reasonable model performance. Validation of seasonal mean, daily minimum and maximum temperatures and mean precipitation with respect to ERA5 and DayMET are shown in Figs. A1-A5 of Appendix A. Validation of seasonal mean wind speed and directional distribution (Fig. A6, A7), compared with ERA5 and selected observation stations, respectively, further confirms the reasonable performance of the model, albeit the underestimation of wind magnitudes compared with station observations (which is expected as grid-averaged values are compared with point observations). Additionally, the extreme rainfall intensity-relation simulated by GEM4_ERA5 agree well with those at selected station observations (Fig. A8). When compared with those from a coarse resolution simulation, i.e. GEM50_ERA, GEM4_ERA5 better captures the relation, particularly for short durations, showing the added value of the ultra-high resolution simulations.

Since this study focusses on projected changes based on the GEM4_CanESM2 simulations, mean annual temperature and freezing index for the current 1991–2020 period for this simulation are also shown in Fig. 2. Comparison of GEM4_CanESM2 with GEM4_ERA5 will help assess the boundary forcing errors, i.e. errors associated with the driving data. The GEM4_CanESM2 simulated temperatures are warmer than those of GEM4_ERA5 and this is due to the warm bias of the driving CanESM2 data, which has been reported in many

previous studies. This warm temperature bias is also reflected in the lower freezing index values simulated by GEM4_CanESM2. Additionally, Fig. 3 shows the ensemble mean of the mean temperature and freezing index of the CORDEX simulations considered in this study. Note that an in-depth analysis of the CORDEX simulations is not the focus of this study and so we do not present model errors for individual models. The ensemble mean fields for the CORDEX and GEM50_CanESM2, when compared with results from DayMet in Fig.1 provide useful insights with respect to total errors (i.e. performance and boundary forcing errors). Clearly, both CORDEX and GEM ensemble means show warmer temperatures and therefore lower freezing index values, which should be considered when interpreting the projected changes based on these ensembles. Similarly results from the existing GEM50_CanESM2 are also shown.

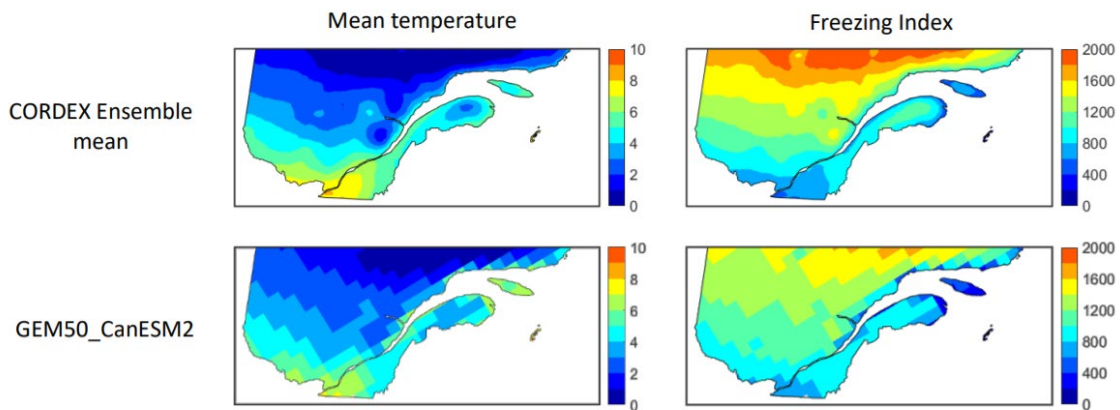


Figure 3: CORDEX and GEM50 ensemble mean annual temperature and freezing index for the 1991–2020 period.

A.4 Projected changes

Projected changes to mean annual 2m temperature and freezing index for the 2041–2070 period with respect to the 1991–2020 period based on GEM10_CanESM2* are shown in Fig. 4 (*Since the 4 km resolution climate change simulation has not completed, results are shown based on the 10 km simulation). Rate of change in the figure is estimated as the slope of the best fit line passing through the 30-year average values separated by 10-year periods (i.e., 1991– 2010, 2001–2030, 2011–2040, 2021–2050, 2031–2060, and 2041–2070). Significant

increases to mean temperature in the 3–4°C range are generally noted with relatively larger increases for the northern parts of the studied region, which is also reflected in the rate of change. Consequently, freezing index is projected to considerably decrease over Quebec with rates of change ranging from -5 to -10 °C days per year.

The projected changes for the same variables for the CORDEX and GEM50 simulations are also shown in Appendix B; they show similar patterns for projected changes, but with different magnitudes depending on the model and the GCM being downscaled. For example,

comparison of the bottom three rows of Fig. B1 show the impact of three different driving data on the projected changes. Model driven by CanESM2 suggests larger increases compared to those driven by MPI and GFDL. This clearly demonstrates the need to consider lateral boundary conditions from more than one GCM. This unfortunately was not possible for the ultra-high resolution climate change simulations that were performed due to the huge computational costs associated with it.

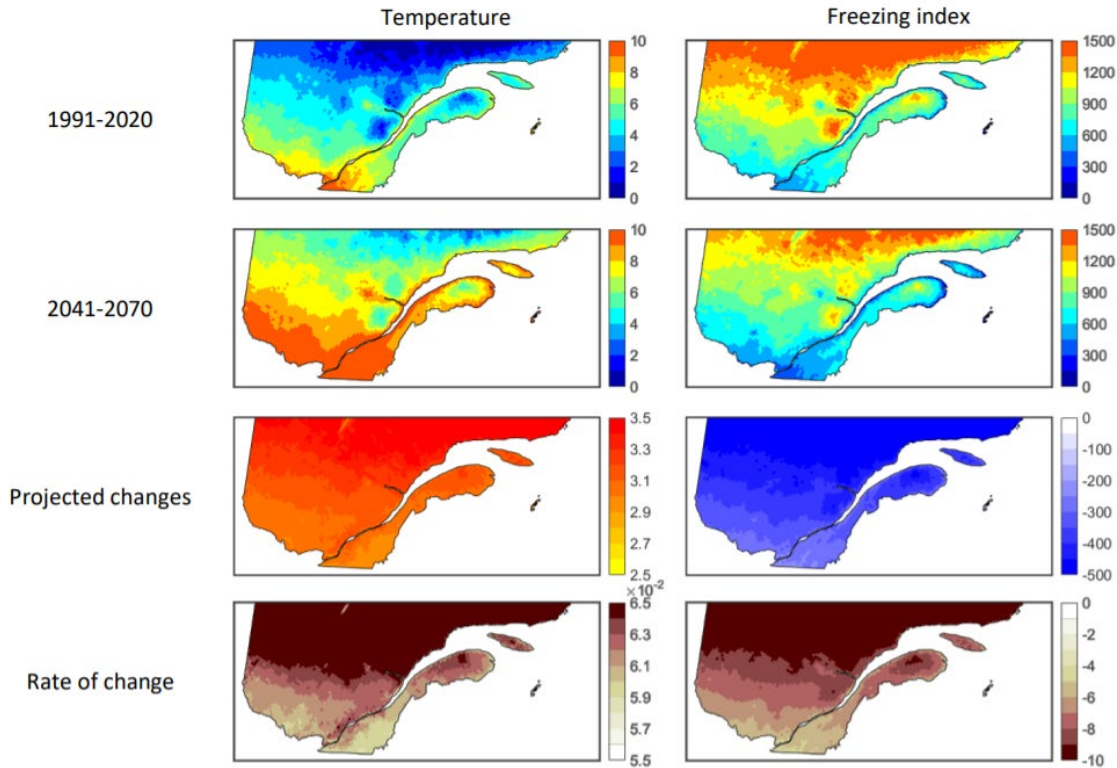


Figure 4: Mean annual temperature and freezing index obtained from GEM10 for the current 1991–2020 and future 2041–2070 periods, and their rates of change.

A.5 Assessment of the validity of the climatic zones (for discussion)

Based on the patterns of projected changes for mean temperature and freezing index discussed above, particularly the rate of change, some changes to zone 2 can be considered. Firstly, zone 2 (in yellow) can be expanded to cover the south-western parts of Quebec as they show similar patterns for rate of change for both variables. Secondly, the Bas-Saint-Laurent and Gaspésie regions (shown in blue in the right panel of Fig. 5) show rate of change values slightly higher than that for rest of zone 2 for both temperature and freezing index. This could therefore be considered as a separate zone. These results were conveyed to the project lead team to finally decide if such an amendment is required to the existing climatic zones by looking at them from other pavement-related perspectives.

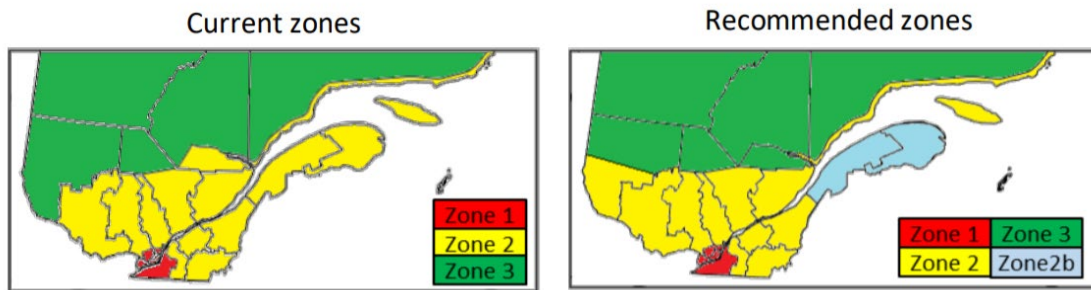


Figure 5: Current pavement zones defined by MTQ for pavement class (left panel) and potential changes to these zones when considering future climate characteristics (right panel).

A.6 References

- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., and Staniforth, A. (1998). The Operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part I: Design Considerations and Formulation. *Monthly Weather Review*, 126(6), 1373-1395.
- Dee, D. P., Uppala, S., Adrian, S., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . Frédéric, V. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system – This report is superseded by the version published in Q J Roy Meteor Soc. Retrieved from Shinfield Park, Reading: <https://www.ecmwf.int/node/8946>
- Diro, G., and Sushama, L. (2019). Simulating Canadian Arctic Climate at Convection-Permitting Resolution. *Atmosphere*, 10, 430. doi:10.3390/atmos10080430
- Dukhan, T., and Sushama, L. (2021). Understanding and modelling future wind-driven rain loads on building envelopes for Canada. *Building and Environment*, 196, 107800.
- Palmer, T. (2014). Build high-resolution global climate models. *Nature*, 515(7527), 338.
- Qiao, Y., Dawson, A. R., Parry, T., Flintsch, G., and Wang, W. (2020). Flexible Pavements and Climate Change: A Comprehensive Review and Implications. 12(3), 1057.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., . . . Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33. doi:10.1007/s10584-011-0149-y
- Teufel, B., and Sushama, L. (2019). Abrupt changes across the Arctic permafrost region endanger northern development. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/s41558-019-0614-6.
- Zhao, Y., and Sushama, L. (2020). Aircraft Takeoff Performance in a Changing Climate for Canadian Airports. *Atmosphere*. doi:10.3390/atmos11040418

A.7 Appendix A:

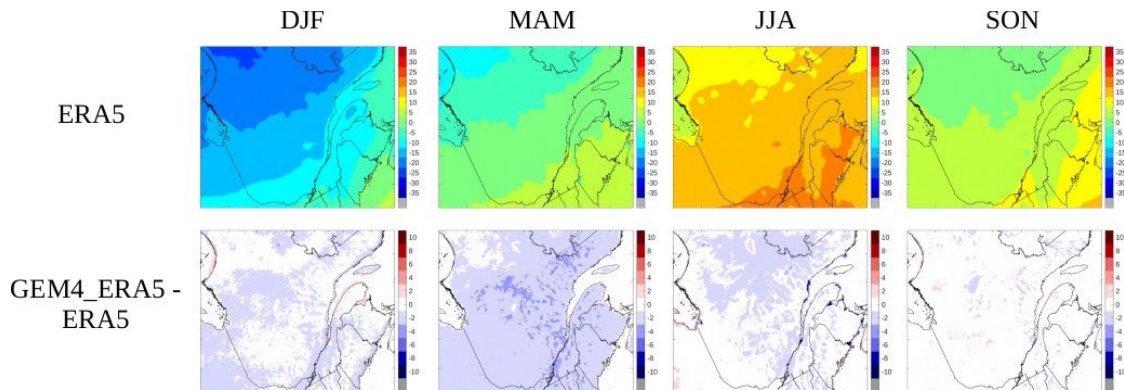


Figure A1: ERA5 mean temperatures for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and ERA5 values (bottom panel).

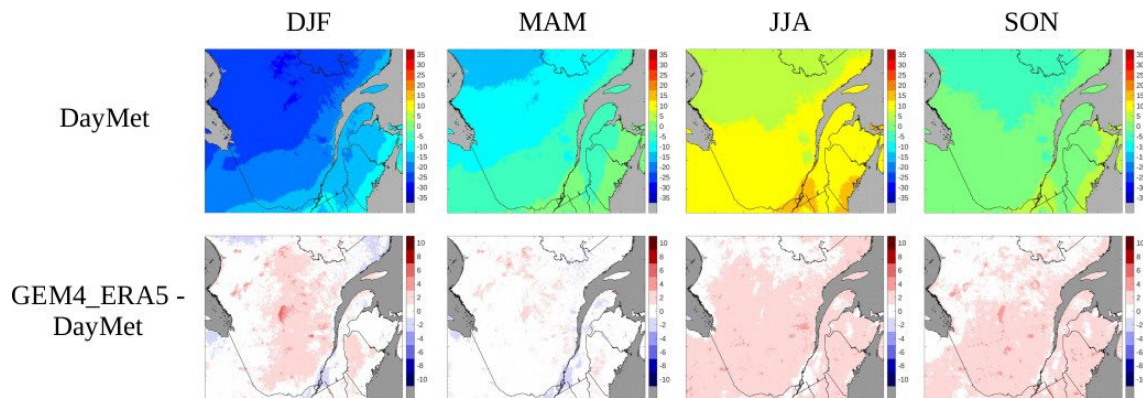


Figure A2: DayMet mean daily minimum temperatures for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and DayMet values (bottom panel).

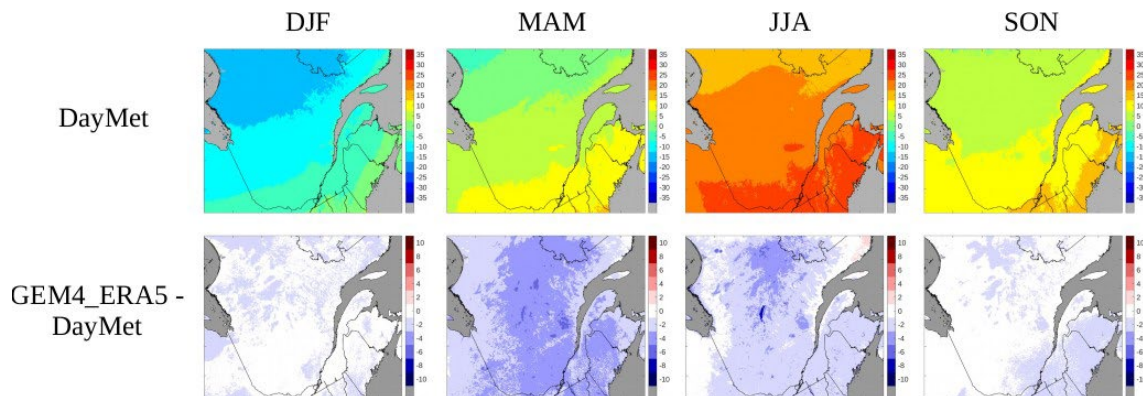


Figure A3: DayMet mean daily maximum temperatures for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and DayMet values (bottom panel).

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

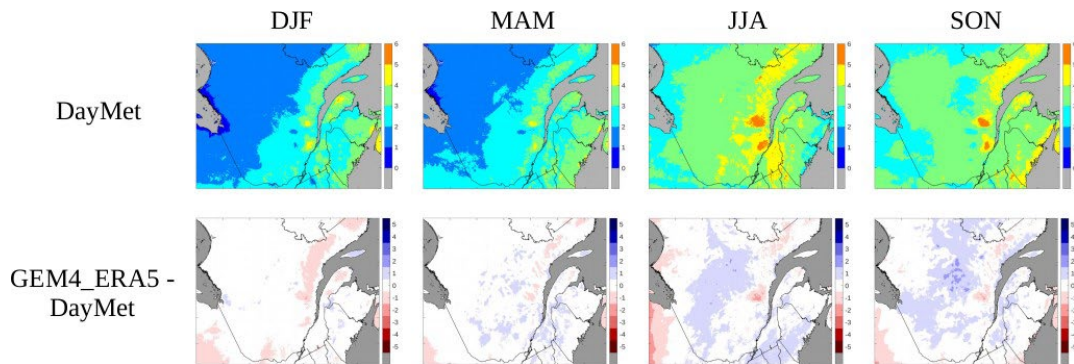


Figure A4: DayMet mean precipitation (mm/day) for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and DayMet values.

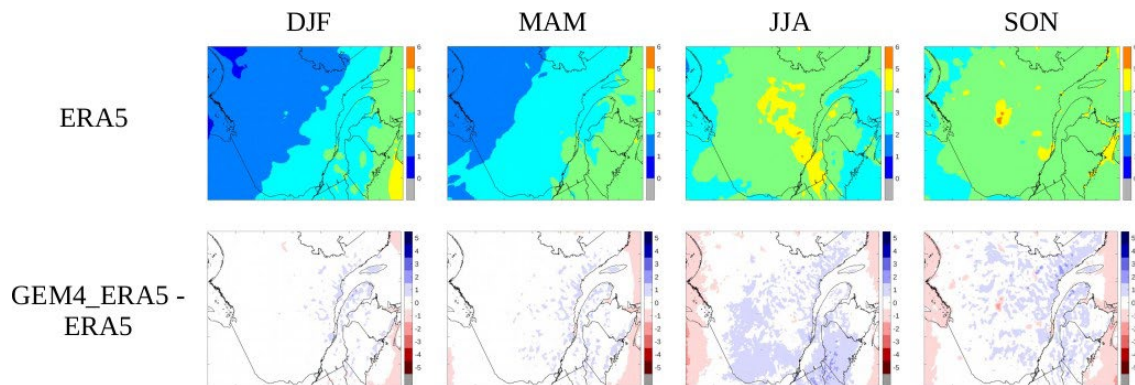


Figure A5: ERA5 mean precipitation (mm/day) for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and ERA5 values.

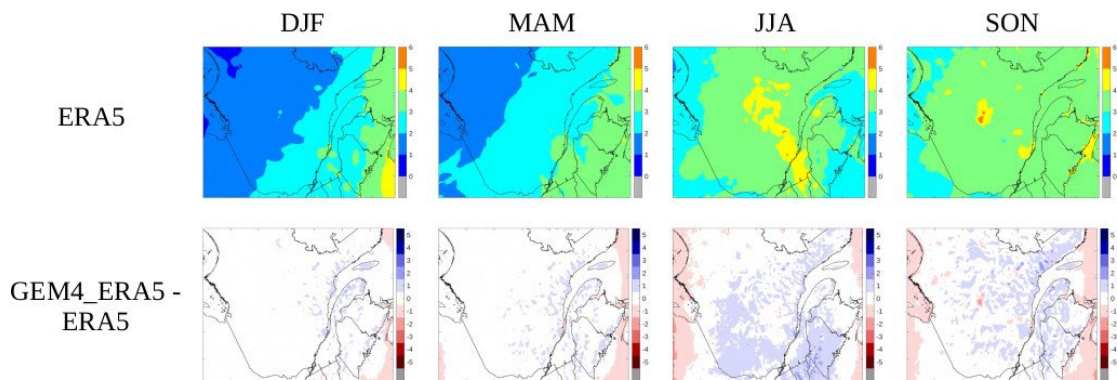


Figure A6: ERA5 mean wind speed (m/s) for various seasons for the 1989–2010 period (top panel) and differences between GEM4_ERA5 and ERA5 values.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

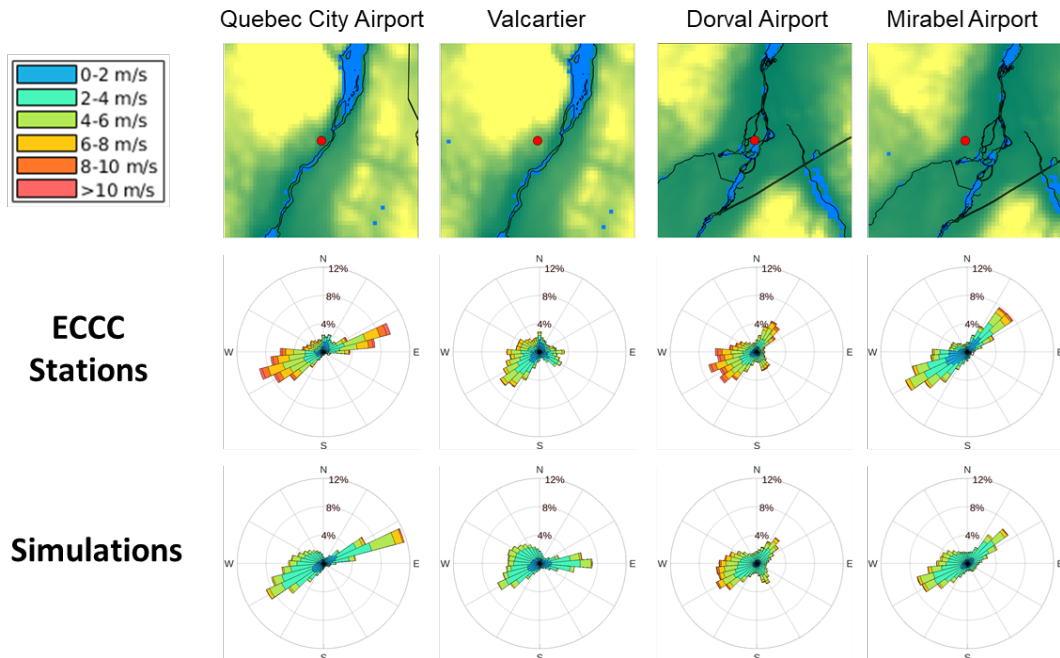


Figure A7: Location of the wind observation points (top panel) and the directional distribution of wind speeds obtained from ECCC station datasets and GEM4_ERA5 for the 1989–2010.

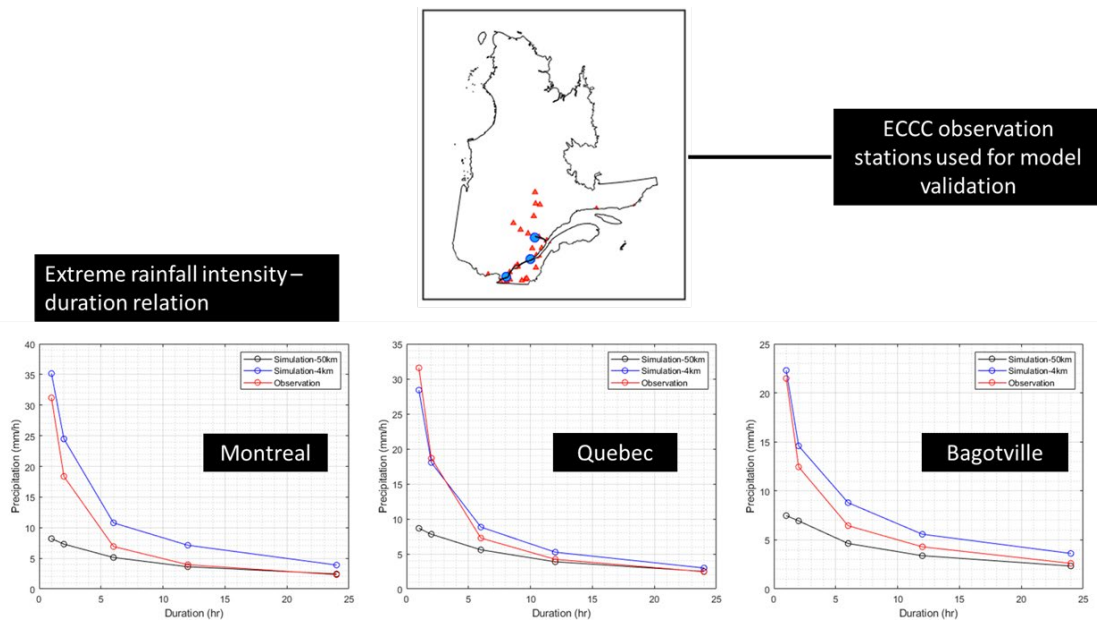


Figure A8: Precipitation intensity-duration estimates corresponding to 10 year-return period obtained from ECCC observation stations, GEM50_ERA and GEM4_ERA5.

A.8 Appendix B:

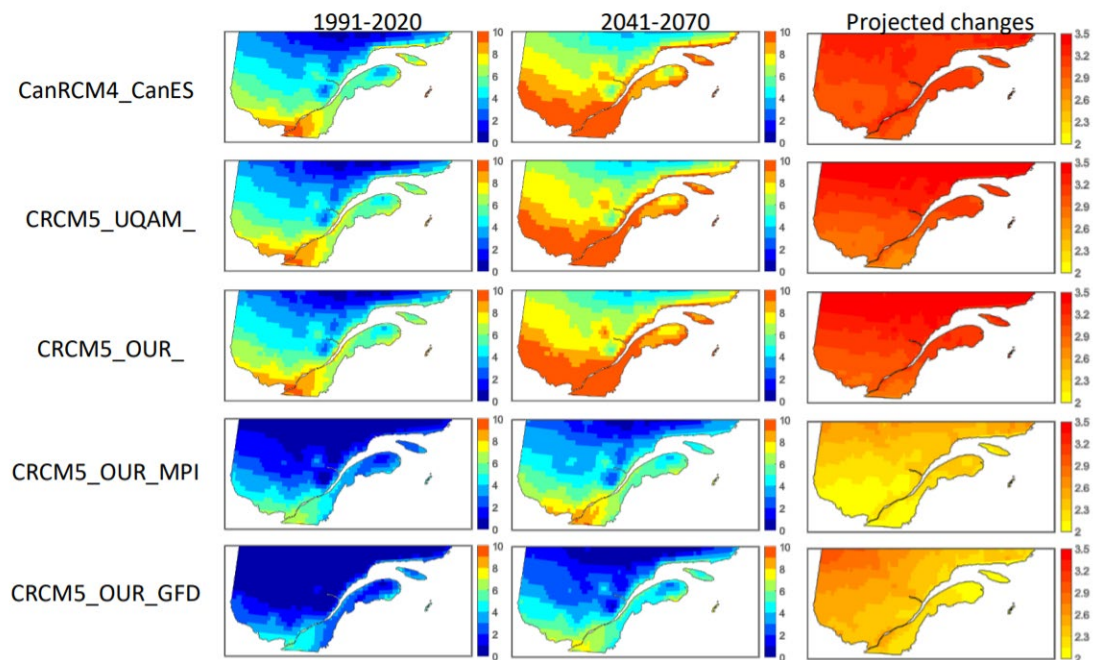


Figure B1: Mean annual temperature for the CORDEX simulations for the 1991–2020 and 2041–2070 periods, and projected changes.

ÉTALONNAGE DU LOGICIEL AASHTOWARE PAVEMENT ME DESIGN POUR LE DIMENSIONNEMENT
DES CHAUSSÉES EN TENANT COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES - CC29.1

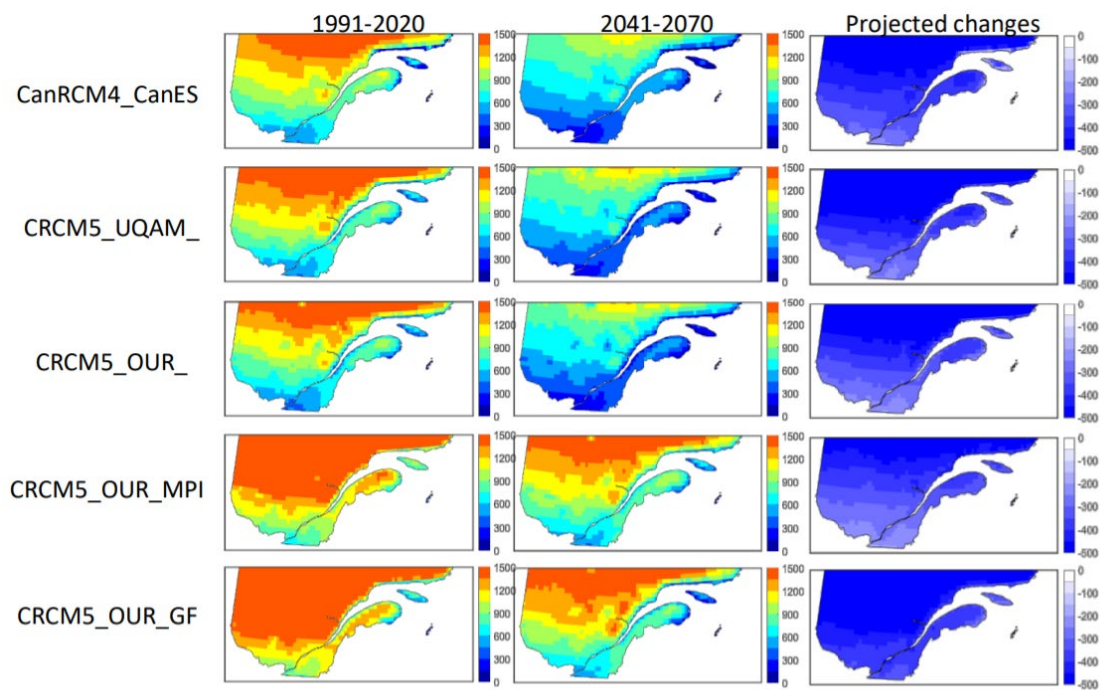


Figure B2: Freezing index for the CORDEX simulations for the 1991–2020 and 2041– 2070 periods, and projected changes.

ANNEXE B

***LISTE DES SECTIONS DE CHAUSSÉES UTILISÉES POUR L'ÉTALONNAGE
DU LOGICIEL AASHTOWare PMED***

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00005-01-052-000D	8.46	10.67	45.573	-75.873					Aucune information sur la structure. Présence d'un pont au début du tronçon
00005-01-052-000D	14.96	15.83	45.615	-75.917			•	•	FC et FT==> Données peu représentatives
00005-01-052-000G	8.50	10.82	45.572	-75.874					Aucune information sur la structure. Présence d'un pont au début du tronçon
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891			•	•	FC et FT→Données Peu représentatives
00010-01-040-000G	0.00	0.00	45.463	-73.456					Aucune information sur la structure
00010-02-120-000G	0.00	0.35	45.364	-72.934	•	•	•	•	Présence d'un pont au début du tronçon
00015-01-013-000D	3.04	3.89	45.094	-73.468					Présence d'un géotextile.
00015-01-013-000G	3.02	3.89	45.363	-72.930					Présence d'un géotextile
00015-01-040-000D	7.34	9.22	45.263	-73.468			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00015-01-053-000D	0.00	1.40	45.281	-73.476			•	•	FC et FT ==> Données Peu représentatives Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00015-01-055-000D	0.00	2.40	45.293	-73.484			•	•	FC et FT ==> Données Peu représentatives
00015-01-055-000D	2.40	4.71	45.312	-73.499			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00015-03-153-000G	0.00	0.00	45.940	-74.129					Données manquantes
00020-01-025-000D	7.84	8.58	45.266	-74.223	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 3 ans de la mise en construction de la route
00020-01-025-000G	7.84	8.58	45.266	-74.223			•		FC, FT et IRI==> Tendances étranges
00020-01-040-000G	0.00	0.61	45.271	-74.217			•	•	FC==> Tendance étrange
00020-02-010-000G	0.00	0.00	45.405	-73.954					Aucune information sur la structure. Présence d'un pont/viaduc
00020-05-120-000G	0.60	1.20	46.380	-71.855					Présence d'une couche d'isolation.
00020-06-250-000G	0.00	0.00	47.041	-70.407					Manque d'informations sur la structure
00020-07-210-000D	0.00	0.00	47.615	-69.730					Manque d'informations sur la structure
00020-08-105-000G	5.15	3.47	47.904	-69.481					Manque d'informations sur la structure
00020-08-140-000C	12.18	13.80	48.042	-69.283	•		•	•	FT==> Tendance étrange

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.340			•	•	FC et FT==> Données peu représentatives
00020-08-140-000C	0.42	2.04	47.988	-69.382			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00020-09-095-000C	0.53	4.66	48.491	-68.447	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 6 ans de la mise en construction de la route
00020-09-117-000C	0.00	2.94	48.515	-68.406	•	•	•	•	Ajustement de la courbe ==> Réhabilitation après 4 ans
00020-09-117-000C	2.94	7.65	48.532	-68.375	•	•	•	•	
00020-09-117-000C	7.65	11.58	48.553	-68.319	•	•	•	•	
00020-09-120-000C	0.00	4.36	48.570	-68.272	•	•	•	•	
00020-09-130-000G	0.00	1.15	48.591	-68.222	•	•	•	•	
00025-01-082-000G	2.04	2.70	45.707	-73.650					Présence d'un pont/viaduc.
00025-01-150-000D	0.00	0.00	45.883	-73.658					Aucune information sur la structure
00025-01-150-000G	0.00	0.00	45.883	-73.659					Aucune information sur la structure
00035-01-035-000D	19.00	22.53	45.272	-73.209	•	•		•	Orniérage==> Tendance étrange Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00035-01-035-000D	15.52	19.00	45.251	-73.183			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00035-01-035-000D	12.46	15.52	45.237	-73.149			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00035-01-035-000D	8.00	12.46	45.204	-73.128				•	FC, Orniérage et FT==>Tendances étranges
00035-01-035-000D	4.00	8.00	45.168	-73.128			•	•	FC et FT==>Tendances étranges
00035-01-035-000D	0.00	4.00	45.132	-73.127			•	•	FC et FT==>Tendances étranges
00035-01-035-000G	20.00	22.87	45.280	-73.213				•	FC, Orniérage et FT==> Tendances étranges
00035-01-035-000G	16.00	20.00	45.252	-73.188					Tendances étranges
00035-01-035-000G	8.00	12.00	45.203	-73.129				•	FC, Orniérage et FT==>Tendances étranges
00035-01-035-000G	4.00	8.00	45.167	-73.128				•	FC, Orniérage et FT==>Tendances étranges
00035-01-035-000G	0.00	4.00	45.131	-73.127				•	FC, Orniérage et FT==> Tendances étranges
00035-02-053-000D	0.00	0.00	45.353	-73.288					Manque d'informations sur la structure
00035-02-053-000G	3.50	3.60	45.354	-73.288					Manque d'informations sur la structure

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00040-04-010-000D	0.00	2.41	45.707	-73.509			•		Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route FC et FT==> Tendances étranges / IRI==> Données manquantes
00040-06-090-000D	0.00	3.22	46.465	-72.378	•	•	•	•	Ajustement avant 3 ans de la fin de vie de la route
00040-06-100-000G	0.00	0.31	46.479	-72.341			•		FC, FT, et IRI==> Données peu représentatives
00040-06-100-000G	0.54	1.96	46.480	-72.336			•	•	Ajustement de la courbe 6 ans avant la fin de vie de la route FC et FT==> Tendances étranges
00040-06-110-000D	1.01	2.00	46.510	-72.296			•	•	Donnée manquante : Nombre de voies
00040-06-120-000D	0.53	1.63	46.522	-72.287			•	•	Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00040-06-120-000D	1.63	2.59	46.531	-72.280			•	•	FC et FT ==> Données Peu représentatives
00040-06-130-000D	0.00	2.05	46.539	-72.274	•		•	•	Ajustement de la courbe 5 ans avant la fin de vie de la route FC et FT ==> Tendances étranges
00040-06-140-000D	0.00	3.40	46.552	-72.256			•	•	FC et FT==> Mesures peu représentatives
00040-06-140-000D	3.40	3.79	46.574	-72.224			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00040-06-150-000D	0.00	0.51	46.576	-72.221	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00040-06-150-000D	0.75	1.05	46.581	-72.214					Présence d'un pont au début du tronçon
00040-06-150-000D	1.05	1.60	46.583	-72.211			•	•	FC et FT==> Données peu représentatives
00040-06-150-000D	1.60	2.65	46.586	-72.206	•	•	•	•	
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-011-000G	9.70	10.07	45.553	-75.424					Données manquantes
00050-02-062-000C	0.15	2.44	45.625	-75.240			•		FC, FT et IRI==> Tendances étranges
00050-02-071-000D	0.00	2.40	45.627	-75.202			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-071-000G	0.00	2.39	45.627	-75.202			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-085-000D	0.00	2.50	45.641	-75.166			•	•	FC et FT==> Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00050-02-085-000G	0.00	2.50	45.641	-75.166			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-092-000C	5.39	9.53	45.646	-75.066			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131			•	•	
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	•	•	•		Manque d'informations sur la structure
00050-02-101-000D	0.00	2.25	45.665	-75.009			•		FC, FT et IRI==> Tendances étranges
00050-02-101-000G	4.85	7.00	45.674	-74.948			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971			•		FC, Orniérage et FT==> Tendances étranges
00050-03-010-000C	17.66	20.77	45.653	-74.803	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 1 an de la mise en construction de la route
00050-03-020-000C	0.00	3.99	45.650	-74.544	•	•	•	•	
00050-03-040-000D	0.00	2.30	45.632	-74.410	•	•	•	•	
00050-03-040-000G	0.00	0.97	45.632	-74.410	•	•	•		IRI ==> Tendance étrange/Nuage de points concentrés entre 1 et 1,5 m/km
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116					Manque d'informations sur la structure
00050-04-013-000C	8.00	10.05	45.678	-74.177					Manque d'informations sur la structure
00055-01-031-000G	0.67	1.83	45.008	-72.088	•	•	•	•	Donnée manquante; nombre de voies
00055-03-071-000D	2.00	4.00	45.830	-72.452	•	•	•	•	
00055-03-071-000D	0.00	2.00	45.819	-72.432			•	•	FC et FT==> Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506					Données peu représentatives
00055-04-112-000D	0.00	1.75	46.263	-72.490			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00055-04-112-000G	3.03	3.03	46.282	-72.518					Manque d'informations sur la structure
00055-04-112-000G	0.00	3.03	46.263	-72.490			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00070-01-083-000D	0.91	1.81	48.423	-71.346			•		FC, FT et IRI==> Tendances étranges
00070-01-083-000G	7.63	8.54	48.395	-71.268			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00070-01-083-000G	4.89	5.80	48.412	-71.328			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00070-01-083-000G	0.91	1.81	48.423	-71.345			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00073-01-090-000D	0.00	3.04	46.172	-70.687			•	•	

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00073-01-090-000G	0.00	3.43	46.172	-70.688	•	•	•	•	
00073-01-099-000D	4.00	7.55	46.232	-70.748					Données manquantes
00073-01-107-000D	0.00	1.90	46.252	-70.783	•		•	•	FT==> Tendance étrange
00073-01-107-000D	9.43	10.50	46.309	-70.858	•		•		FT et IRI ==> Tendances étranges
00073-01-107-000G	0.00	1.90	46.251	-70.784	•			•	Orniérage et FT==> Tendances étranges
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	•		•	•	FT ==> Valeur aberrante
00073-01-107-000G	8.22	9.43	46.302	-70.848	•		•	•	FT==> Tendance étrange
00073-01-132-000D	11.03	12.09	46.405	-70.921					Tendances étranges
00073-01-132-000D	6.83	11.03	46.376	-70.888	•		•	•	FT==>Tendance étrange
00073-01-132-000G	10.81	8.20	46.403	-70.919					Manque d'informations sur la structure
00073-01-132-000G	8.04	3.00	46.318	-70.864					Manque d'informations sur la structure
00073-01-156-000D	7.50	10.47	46.449	-71.012			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00073-01-156-000D	3.54	5.20	46.427	-70.971			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00073-01-156-000D	0.00	3.54	46.411	-70.931			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00085-01-010-000D	12.87	14.16	47.540	-68.627			•	•	FC et FT ==>Tendances étranges
00085-01-010-000D	8.38	12.82	47.529	-68.570			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00085-01-010-000D	7.21	8.38	47.527	-68.555	•	•	•	•	
00085-01-010-000D	3.77	7.18	47.504	-68.526	•	•	•	•	
00085-01-010-000D	0.00	3.74	47.485	-68.484	•	•	•	•	
00085-01-010-000G	12.87	14.14	47.539	-68.627					Présence d'un pont au début du tronçon Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00085-01-010-000G	8.51	12.82	47.529	-68.572			•	•	FC et FT→Tendance étrange Projet écarté : âge de revêtement < 6 ans
00085-01-010-000G	7.19	8.51	47.527	-68.555	•	•	•	•	
00085-01-010-000G	3.79	7.16	47.503	-68.527	•		•	•	FT==> Valeur aberrante
00085-01-010-000G	0.00	3.76	47.485	-68.485			•	•	FC et FT==> Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.810			.	.	FC et FT → Données Peu représentatives Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00085-01-040-000D	4.65	13.68	47.565	-68.699					Données peu représentatives
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656			.	.	FC et FT ==> Tendances étranges
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.810	.	.	.	.	Manque d'informations sur la structure
00085-01-040-000G	9.20	13.63	47.590	-68.740	.	.	.	.
00085-01-040-000G	4.88	9.20	47.566	-68.701			.	.	FC et FT ==> Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653			.		FC, FT et IRI ==> Tendances étranges
00085-01-050-000D	11.70	12.25	47.673	-68.962	.		.	.	Ajustement de la courbe après 3 ans de la mise en construction de la route FT ==> Valeur aberrante
00085-01-050-000G	0.04	0.55	47.669	-68.868	.	.	.	.
00085-01-145-000D	0.00	2.19	47.797	-69.486	.	.	.	.	Ajustement de la courbe ==> Réhabilitation après 3 ans
00104-04-031-000C	0.51	1.35	45.400	-73.453					Présence d'un géotextile
00104-04-031-000C	2.89	3.74	45.394	-73.435					Présence d'un géotextile.
00104-07-060-000C	0.00	0.00	45.243	-72.885					Aucune information sur la structure
00104-07-090-000C	0.00	0.00	45.221	-72.837					Aucune information sur la structure. Présence de courbes (prononcées)
00104-07-090-000C	2.70	5.11	45.210	-72.807	.	.	.	.
00105-01-121-000C	4.58	6.12	45.718	-75.914					Tendances étranges
00105-02-030-000C	6.50	8.26	46.001	-76.044	.		.	.	FT ==> Tendance étrange Fichier.dgpx non existant (correction fluage)
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	.	.	.	.
00108-02-115-000C	0.00	0.31	45.954	-70.933	.		.		FT et IRI ==> Tendances étranges
00112-01-061-000D	0.57	1.42	45.503	-73.489	.	.	.		IRI ==> Données manquantes
00112-01-061-000D	1.42	2.84	45.505	-73.470	.		.		Ajustement de la courbe après 1 an de la mise en construction de la route
00112-01-061-000D	2.84	3.70	45.507	-73.452	.	.	.	.	Manque d'informations sur la structure

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00112-01-061-000G	0.57	1.42	45.504	-73.489					Présence d'un pont/viaduc
00112-01-061-000G	1.42	2.84	45.505	-73.471	•		•		IRI→Donnée manquante/ FT→Valeur aberrante
00112-01-061-000G	2.84	3.70	45.507	-73.453	•	•	•	•	Manque d'informations sur la structure
00113-03-080-000C	0.00	0.00	49.816	-75.458					Aucune information sur la structure
00116-01-200-000G	4.72	5.52	45.539	-73.255					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation)
00116-03-070-000C	0.00	1.72	46.096	-71.925			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00116-03-085-000C	0.63	2.53	46.114	-71.910	•	•	•	•	Ajustement 1 an avant la fin de vie de la route
00116-03-085-000C	3.70	4.48	46.134	-71.895			•	•	Ajustement de la courbe 2 ans avant la fin de vie de la route FC et FT ==> Données peu représentatives
00116-03-085-000C	5.21	6.19	46.152	-71.887	•	•	•	•	
00116-03-261-000C	0.00	2.98	46.421	-71.576			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00116-03-261-000C	2.98	4.20	46.443	-71.555	•	•	•	•	
00116-03-280-000C	2.40	4.70	46.471	-71.525	•	•	•	•	
00116-03-291-000C	1.54	3.96	46.508	-71.486			•	•	FC et FT==> Tendances étranges Projet.dgpx retiré→problème de fluage
00116-03-291-000C	4.00	6.10	46.537	-71.456				•	FC, Orniérage et FT ==> Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00116-03-361-000C	2.96	3.90	46.624	-71.363			•	•	FC et FT==>Tendances étranges
00117-03-092-000G	0.45	3.20	46.104	-74.388	•	•	•	•	
00117-03-092-000G	3.20	5.50	46.111	-74.423	•	•	•	•	Ajustement de la courbe 1 an avant la fin de vie de la route Présence de courbes (légères)
00117-03-120-000D	0.45	1.80	46.115	-74.470			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00117-03-120-000G	0.29	1.81	46.114	-74.469			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00117-07-040-000C	5.20	9.20	46.907	-76.421	•	•	•	•	
00117-07-040-000C	9.20	13.20	46.942	-76.432	•	•	•	•	Présence de courbes (légères). Présence d'une pente longitudinale (légères)
00117-07-040-000C	13.20	17.91	46.970	-76.464	•	•	•	•	

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00117-07-050-000C	0.00	3.54	47.000	-76.506	•	•	•	•	
00117-07-050-000C	3.54	4.65	47.023	-76.537	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 7 ans de la mise en construction de la route Présence d'une pente longitudinale (légères)
00117-07-050-000C	11.00	13.86	47.081	-76.546	•	•	•	•	
00117-07-060-000C	0.00	2.50	47.094	-76.576	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 6 ans de la mise en construction de la route
00117-07-060-000C	2.50	7.00	47.111	-76.596	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00117-09-095-000C	11.50	11.84	48.223	-78.964	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00122-01-033-000C	1.48	2.43	45.921	-72.756				•	FC, FT et Orniérage → Données Peu représentatives
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	•	•	•		IRI==>Tendance étrange
00122-01-051-000C	0.00	0.65	45.917	-72.696			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00122-01-263-000C	2.50	3.37	46.031	-72.073			•	•	FC et FT ==> Données Peu représentatives Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00122-01-273-000C	0.00	1.58	46.034	-72.063			•	•	FC et FT==> Mesures peu représentatives
00132-03-110-000D	0.59	0.59	45.384	-73.542					Aucune information sur la structure
00132-03-110-000D	0.59	2.00	45.382	-73.536	•	•	•	•	
00132-03-110-000G	0.59	0.59	45.384	-73.542					Aucune information sur la structure
00132-03-110-000G	0.59	2.00	45.382	-73.535	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378					Données manquantes
00132-14-015-000C	5.34	6.79	48.637	-68.171	•	•	•	•	
00132-15-090-000C	0.52	1.62	49.226	-65.987					Présence d'un pont au début du tronçon.
00132-15-120-000C	6.63	7.08	49.257	-65.563					Tendances étranges
00132-17-185-000C	3.22	4.37	48.334	-64.739	•			•	FT et Orniérage ==> Tendances étranges
00132-18-175-000C	3.83	4.30	48.199	-65.880				•	FC, FT et Orniérage → Données Peu représentatives
00132-19-102-000C	0.90	3.46	48.138	-66.431	•	•	•	•	

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00132-19-102-000C	3.96	6.41	48.127	-66.468	•	•	•	•	Présence d'un pont au début du tronçon
00132-19-102-000C	6.41	8.51	48.115	-66.495	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 4 ans de la mise en construction de la route
00132-19-107-000C	1.28	4.20	48.056	-66.576	•	•	•	•	
00132-20-312-000C	0.23	1.81	48.595	-68.210	•	•	•	•	
00133-02-135-000C	6.28	7.19	45.779	-73.164	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00133-02-155-000C	0.00	0.70	45.786	-73.159			•	•	FC et FT → Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00134-01-021-000G	0.00	0.35	45.393	-73.513					Présence d'un pont/viaduc
00137-01-015-000C	0.00	0.59	45.786	-73.159			•		FC, FT et IRI ==> Tendances étranges
00138-03-095-000C	2.96	6.20	45.929	-73.244	•	•	•	•	
00138-04-131-000C	6.65	7.33	46.287	-72.644				•	FC, FT et Orniérage ==> Tendances étranges Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00138-05-071-000C	5.09	6.51	46.492	-72.254	•		•	•	FT → Tendance étrange Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00138-06-025-000C	7.21	7.82	46.597	-72.026					Manque d'informations sur la structure
00138-08-222-000C	9.92	11.88	48.065	-69.762					Manque d'informations sur la structure
00138-08-222-000C	11.97	12.44	48.080	-69.748					Présence d'un pont au début du tronçon
00138-11-051-000C	0.21	3.41	50.300	-64.312					Présence d'un pont/vccdu.
00138-11-070-000C	13.83	14.34	50.305	-63.821				•	FC, Orniérage et FT ==> Valeurs aberrantes
00138-11-095-000C	13.30	14.78	50.262	-63.627	•	•		•	Ajustement de la courbe 5 ans après sa mise en construction Orniérage ==> Tendance étrange Projet écarté : Fichier.dgpx (fluage)
00138-91-121-000C	1.56	2.81	48.592	-69.122			•	•	FC et FT ==> Données Peu représentatives
00138-91-121-000C	2.81	5.42	48.602	-69.115	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00138-91-121-000C	5.42	7.09	48.625	-69.107			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00138-91-132-000C	0.70	2.50	48.666	-69.090					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation)
00138-91-132-000C	2.50	5.42	48.689	-69.091	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00143-01-115-000C	3.19	4.26	45.264	-71.940	•	•	•	•	
00148-03-021-000C	1.82	2.56	45.497	-75.957					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation)
00148-03-021-000C	0.00	0.00	45.481	-75.954					Aucune information sur la structure
00148-06-021-000C	0.68	2.00	45.680	-74.190	•		•	•	FT→Tendance étrange
00148-06-021-000C	2.00	4.00	45.667	-74.172	•		•	•	FT→Tendance étrange Donnée manquante : % de camions
00148-06-021-000C	4.00	6.64	45.654	-74.155	•		•	•	FT→Tendance étrange Donnée manquante : % de camions
00155-03-121-000C	8.78	9.53	46.861	-72.800	•	•			Orniérage et IRI==> Tendances étranges
00155-03-132-000C	0.00	0.70	46.858	-72.809			•	•	FC et FT ==>Tendances étranges
00155-03-160-000C	0.00	1.10	47.077	-72.917	•	•		•	Ajustement de la courbe après 12 ans de la mise en construction de la route, Orniérage→ tendance étrange
00155-03-160-000C	1.10	6.30	47.087	-72.918			•	•	Ajustement de la courbe après 1 an de la mise en construction de la route FC et FT ==> Informations manquantes
00155-03-160-000C	6.30	9.29	47.129	-72.895	•	•	•	•	Présence d'une pente longitudinale (légères).
00155-03-160-000C	10.01	12.22	47.160	-72.880			•	•	Ajustement de la courbe après 12 ans de la mise en construction de la route FC et FT→Tendances étranges
00155-03-192-000C	5.54	9.54	47.373	-72.783	•	•	•	•	
00155-03-192-000C	9.54	13.54	47.405	-72.764	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00155-04-011-000C	10.71	12.36	47.708	-72.521	•	•			Orniérage et IRI ==> Tendances étranges.
00155-04-050-000C	0.67	3.46	47.901	-72.436			•	•	FC et FT==> Tendances étranges
00155-04-060-000C	2.30	2.90	48.018	-72.310					Manque d'informations sur la structure
00155-04-060-000C	6.10	7.57	48.047	-72.287			•	•	FC et FT ==> Valeurs aberrantes
00155-04-070-000C	3.95	4.53	48.103	-72.244					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation)

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00155-04-070-000C	0.00	0.00	48.129	-72.230					Aucune information sur la structure.
00155-04-112-000C	0.00	0.00	48.359	-72.106					Aucune information sur la structure
00157-01-021-000C	6.40	7.53	46.441	-72.618			•	•	FC et FT ==> Valeurs aberrantes
00157-01-042-000C	0.00	0.90	46.449	-72.627	•	•	•	•	Donnée manquante=nombre de voies→section retirée
00157-01-042-000C	0.90	1.82	46.454	-72.635	•	•	•	•	
00157-01-042-000C	2.35	4.17	46.460	-72.643	•		•	•	FT==> Tendance étrange Donnée manquante : Nombre de voies
00157-01-042-000C	4.17	4.65	46.474	-72.665		•	•	•	Donnée manquante; nombre de voies
00158-02-015-000C	0.73	2.00	45.838	-73.831					Manque d'informations sur la structure
00158-02-015-000C	2.99	4.50	45.842	-73.806	•	•	•	•	
00159-01-081-000C	0.00	0.38	46.617	-72.386					Tendances étranges
00159-01-081-000C	3.70	4.10	46.632	-72.426					Présence d'une couche d'isolation.
00161-02-161-000C	1.60	2.03	46.099	-72.230	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00167-01-131-000C	1.58	2.28	49.147	-73.585			•		FC et FT→Données manquantes IRI→Tendance étrange
00169-01-051-000C	4.40	4.80	48.124	-71.567	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 7 ans de la mise en construction de la route
00169-01-062-000C	3.63	5.66	48.210	-71.653					Manque d'informations sur la structure
00169-01-062-000C	7.09	8.00	48.238	-71.671					Manque d'informations sur la structure
00169-01-083-000C	3.49	6.73	48.289	-71.690	•	•	•	•	
00169-02-202-000C	0.56	2.49	48.551	-72.289			•	•	FC et FT==> Mesures peu représentatives/entretien avant 2 ans
00169-02-370-000C	0.24	0.57	48.435	-71.817					Présence d'une pente longitudinale (légères)
00170-01-130-000C	9.95	12.91	48.280	-70.636			•	•	FC et FT==> Valeurs aberrantes
00170-01-130-000C	12.91	13.73	48.297	-70.667			•		FC et IRI==>Tendances étranges / FT==>Valeur aberrante
00172-01-101-000C	6.90	7.76	48.427	-70.665	•	•	•	•	Présence de courbes (légères). Présence d'une pente longitudinale (légères)
00173-01-155-000C	2.81	3.66	46.228	-70.799			•		IRI→ Données peu représentatives

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00175-03-019-000G	7.49	9.57	47.215	-71.224	•	•	•	•	% camion donnée manquante
00175-03-019-000G	10.68	11.64	47.242	-71.229			•	•	% camion donnée manquante FC et FT → Tendances étranges
00175-03-019-000G	19.68	22.11	47.311	-71.183			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-036-000G	0.00	3.63	47.333	-71.177			•	•	FC et FT ==> Mesures peu représentatives
00175-03-036-000G	3.63	7.25	47.359	-71.190			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-036-000G	7.79	11.79	47.388	-71.191			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-036-000G	11.83	15.88	47.425	-71.204			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-036-000G	16.22	18.06	47.461	-71.230			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-072-000D	6.28	7.35	47.561	-71.231			•	•	Ajustement de la courbe après 5 ans de la mise en construction de la route FC et FT ==> Données manquantes Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00175-03-072-000G	6.36	7.43	47.562	-71.231			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-072-000G	10.91	11.99	47.597	-71.240			•		FC, FT et IRI ==> Tendances étranges
00175-03-072-000G	14.66	15.17	47.634	-71.240			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-085-000D	2.14	3.34	47.639	-71.239	•	•	•	•	Tendances atypiques de la performance
00175-03-085-000D	5.36	5.82	47.681	-71.213			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges Projet dgpx écarté (fluage)
00175-03-085-000G	4.50	5.36	47.675	-71.217					Tendances étranges
00175-03-085-000G	8.66	9.20	47.675	-71.217			•	•	FC et FT → Données manquantes Projet dgpx manquant (fluage)
00175-03-085-000G	13.69	14.23	47.756	-71.209	•		•	•	FT ==> Données Peu représentatives
00175-03-095-000G	3.34	3.67	47.639	-71.239					Données manquantes
00175-03-105-000G	8.19	8.49	47.756	-71.209					Données manquantes
00175-03-115-000D	0.00	0.00	47.912	-71.252					Données manquantes

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00175-03-115-000D	5.50	6.67	47.949	-71.223			•	•	Ajustement de la courbe après 5 ans de la mise en construction de la route FC et FT==> Données peu représentatives Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
00175-03-115-000D	10.21	10.95	47.981	-71.222			•		FC, FT et IRI==> Tendances étranges Projet écarté : Problème fichier.dgpx
00175-03-115-000G	0.84	1.28	47.834	-71.254			•	•	FC et FT==> Informations manquantes
00175-03-115-000G	0.02	0.46	0.000	0.000			•	•	FC et FT==> Informations manquantes
00175-03-140-000D	1.10	3.10	48.000	-71.237			•	•	Réhabilitation après 5 ans FC et FT==> Tendances étranges
00175-03-140-000D	9.72	10.08	47.916	-71.253					Présence d'une couche d'isolation
00175-03-140-000G	0.00	3.10	48.000	-71.238			•	•	FC et FT==> Mesures peu représentatives
00175-03-140-000G	3.47	3.81	48.076	-71.263	•	•	•	•	
00175-03-160-000D	0.02	0.78	48.087	-71.264	•	•	•	•	Présence d'un pont au début du tronçon
00175-03-160-000D	10.51	11.26	48.026	-71.225			•	•	FC et FT==> Données peu représentatives
00175-03-160-000G	0.02	1.23	48.087	-71.264			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00175-03-160-000G	10.60	11.67	48.175	-71.241			•	•	FC et FT==> Données peu représentatives
00175-03-170-000D	1.97	2.45	48.185	-71.240			•	•	FC et FT ==>Informations manquantes
00175-03-170-000G	0.02	2.42	48.185	-71.240	•		•	•	FT ==>Données Peu représentatives
00175-03-182-000D	3.48	3.94	48.229	-71.262					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation).
00175-03-182-000G	3.60	6.51	48.174	-71.240			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00191-01-030-000C	0.00	1.85	47.818	-69.496	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00195-01-127-000C	13.38	15.43	48.721	-67.428			•	•	FC==>Tendance étrange
00195-01-131-000C	0.19	1.14	48.724	-67.453	•	•	•	•	
00195-01-135-000C	0.00	0.39	48.726	-67.468	•	•	•	•	
00195-01-140-000C	0.00	0.65	48.726	-67.473	•		•	•	FT==> Tendance étrange
00198-01-130-000C	11.88	13.12	48.860	-65.077					Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00198-02-050-000C	0.97	1.92	48.818	-64.801					Tendances étranges
00198-02-070-000C	1.00	2.43	48.833	-64.688	•			•	Orniérage==>Tendance étrange / FT==>Valeur aberrante
00198-02-070-000C	2.43	3.70	48.836	-64.669					Présence d'un pont au début du tronçon
00198-02-070-000C	4.52	6.57	48.842	-64.655	•		•	•	FT ==> Valeurs aberrantes
00202-02-150-000C	1.52	3.64	45.065	-73.156					Manque d'informations sur la structure.
00204-01-065-000C	3.55	5.03	45.868	-70.633	•	•	•	•	
00204-02-050-000C	0.19	1.19	46.361	-70.421	•	•	•	•	
00209-01-181-000C	6.65	7.18	45.303	-73.593	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00221-01-151-000C	1.70	2.14	45.259	-73.608			•		FC, FT Et Orniérage==> Tendances étranges
00230-01-130-000C	0.00	0.00	47.626	-69.680					Aucune information sur la structure
00232-01-095-000C	9.26	11.71	47.838	-68.812	•		•	•	FT==> Valeur aberrante
00232-01-115-000C	0.00	0.50	47.890	-68.747				•	FC, Orniérage et FT==> Tendances étranges
00235-02-190-000C	0.90	2.93	45.674	-72.978			•	•	Ajustement du début de la courbe après 2 ans de sa mise en construction, FC→Information manquante et FT→Tendance étrange
00249-01-100-000C	4.39	5.31	45.581	-71.989	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00276-01-072-000C	3.46	3.83	46.335	-70.740	•	•	•	•	
00277-01-070-000C	1.65	2.35	46.417	-70.545	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00289-02-040-000C	7.10	7.67	47.652	-69.576	•		•	•	FT==>Tendance étrange
00293-01-020-000C	6.45	7.31	47.877	-68.992			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00293-01-020-000C	7.72	8.35	47.885	-69.002	•			•	Orniérage et FT==> Tendances étranges.
00293-01-065-000C	1.50	2.70	48.078	-69.092	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00293-01-065-000C	3.00	3.35	48.079	-69.095					Présence d'un pont au début du tronçon
00299-02-101-000C	1.60	3.43	48.998	-66.386			•	•	FC ==> Tendance étrange et FT==> Valeur aberrante
00299-02-101-000C	6.18	7.19	49.036	-66.410	•		•	•	FT ==> Tendance étrange
00301-01-123-000C	0.70	1.53	45.811	-76.459			•	•	FC et FT==> Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00301-01-130-000C	0.00	1.80	45.819	-76.460			•	•	FC et FT ==> Tendances étranges
00307-01-031-000C	0.00	0.00	45.508	-75.763					Aucune information sur la structure
00307-01-031-000C	0.00	0.00	45.523	-75.774					Aucune information sur la structure
00309-01-041-000C	0.00	0.00	45.607	-75.387					Aucune information sur la structure
00309-01-045-000C	0.00	0.00	45.608	-75.398					Aucune information sur la structure
00323-01-082-000C	3.93	6.68	45.948	-74.908	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 8 ans de la mise en construction de la route
00329-01-045-000C	4.50	5.70	45.888	-74.264	•	•	•	•	Présence de courbes (légères)
00337-01-038-000D	2.81	3.19	45.741	-73.690	•	•	•		IRI==> Tendance étrange
00337-01-038-000G	2.81	3.19	45.741	-73.690			•	•	FC et FT==> Valeurs aberrantes
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975					Présence d'un pont/viaduc
00338-01-094-000C	0.04	0.70	45.340	-73.978	•	•	•	•	
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109		•	•		FC et IRI → ==> Mesures peu représentatives.
00343-02-030-000C	0.00	0.00	45.242	-72.885					Aucune information sur la structure
00343-02-030-000C	0.00	0.00	46.069	-73.512					Aucune information sur la structure
00343-02-030-000C	0.00	0.00	46.051	-73.488					Aucune information sur la structure
00344-01-005-000C	0.00	1.80	45.657	-74.582	•	•	•	•	Ajustement de la courbe après 2 ans de la mise en construction de la route
00344-01-085-000C	4.08	4.64	45.537	-74.326	•	•	•	•	
00359-01-060-000C	5.60	9.61	46.580	-72.552			•		FC, FT et IRI ==> Tendances étranges
00359-01-091-000C	0.00	1.20	46.592	-72.599			•	•	FC et FT==> Mesures peu représentatives
00362-01-050-000C	8.84	9.50	47.480	-70.335					Manque d'informations sur la structure. Présence d'un pont au début du tronçon
00362-01-060-000C	1.95	2.56	47.483	-70.309					Présence d'une couche d'isolation
00362-01-060-000C	4.32	4.93	47.493	-70.283					Présence d'une couche d'isolation
00362-01-071-000C	0.20	0.99	47.528	-70.224					Présence d'une couche d'isolation.
00381-01-025-000C	7.75	8.75	47.579	-70.546					Tendances étranges

RTSS	Chaînage		Coordonnées		Fissuration		Orniér.	IRI	Commentaires
	Début	Fin	N (°)	W (°)	Charge	Therm			
00381-01-070-000C	4.79	7.60	48.084	-70.822					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation)
00381-01-070-000C	7.60	10.45	48.084	-70.822					Manque d'informations sur la structure (sous-fondation).
00381-01-114-000C	4.94	6.60	48.267	-70.876	.		.	.	Ajustement de la courbe après 4 ans de la mise en construction de la route FT → Tendance étrange
00410-01-100-000G	9.82	12.43	45.369	-71.922					Données peu représentatives
00640-02-051-000D	3.84	3.43	45.613	-73.853					Manque d'informations sur la structure
00730-01-025-000D	1.24	1.91	45.386	-73.608			.	.	FC ==> Données peu représentatives FT ==> Valeurs aberrantes
30205-01-000-000C	0.00	0.48	45.480	-74.286			.	.	Projet écarté par manque de données de trafic sur la période d'analyse
47850-01-020-000C	0.32	1.13	48.355	-70.983					Intersection avec les voies ferrées au début du tronçon.
47850-02-000-000C	0.00	0.40	48.371	-70.966			.	.	FC et FT → Tendances étranges
61490-02-000-000C	0.00	0.00	45.309	-73.741					Aucune information sur la structure
64480-01-030-000D	0.00	0.00	45.524	-73.515					Aucune information sur la structure.
64480-01-030-000G	0.00	0.00	45.525	-73.516					Aucune information sur la structure
64480-01-030-000G	0.00	0.00	45.529	-73.520					Aucune information sur la structure
73380-01-010-000C	0.00	0.00	45.634	-72.145					Aucune information sur la structure.
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921					Manque d'informations sur la structure
75830-05-015-000C	0.00	0.88	45.422	-71.905					Manque d'informations sur la structure
94820-01-020-000C	0.62	1.63	48.497	-68.442	.		.		FT ==> Valeurs aberrantes et IRI → Information manquante
96264-01-010-000C	0.00	0.31	48.599	-68.215	.		.	.	FT → Tendance étrange Donnée manquante : % de camions
96265-01-010-000C	0.00	3.08	47.905	-69.483	.	.	.	.	Ajustement de la courbe ==> Réhabilitation après 4 ans

ANNEXE C

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX NON LIÉS DES FONDATIONS ET SOUS-FONDATIONS

C.1 Introduction

La définition des propriétés physiques typiques des matériaux de fondation et de sous-fondation est importante pour le processus de conception de la chaussée avec l'approche M-E. Cette annexe présente les critères adoptés pour définir les différentes propriétés des matériaux non liés à utiliser dans le processus d'étalonnage.

C.2 Module réversible

Le module réversible (M_r) est le principal paramètre à définir pour les matériaux de fondation et de sous-fondation. Doucet (2014) présente les états de contrainte typiques suivants à titre indicatif pour les fondations: $\sigma_3 = 35$ kPa et $q = (\sigma_1 - \sigma_3) = 70$ kPa, et dans le cas des sous-fondations, les contraintes suivantes sont définies : $\sigma_3 = 20$ kPa et $q = (\sigma_1 - \sigma_3) = 40$ kPa. À partir de ces contraintes, la valeur du module réversible peut être calculée, pour laquelle valeurs de k_1 , k_2 et k_3 sont associées à chaque type de matériau. Dans le cas des matériaux recyclés (MR1, MR2, MR4 et MR5), on utilise le modèle k - θ , qui est décrit dans l'équation suivante :

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (C.1)$$

Où $\theta = q + 3\sigma_3$. Pour les matériaux recyclés, les valeurs de k_1 et k_2 sont obtenues à partir du logiciel Chaussée2 (St-Laurent, 2006a), qui compile une base de données empirique pour la province de Québec avec ces matériaux. Le Tableau 1 présente les valeurs de k_1 , k_2 et k_3 et résume le calcul des valeurs du module réversible pour les différents matériaux.

Tableau 1. Calcul du module réversible

	MG 20^a	MG 112^b	MG 56^a	MG 56^b	MR 1^a	MR2^b	MR 4^a	MR 5^b
k_1	2,45	1,61	2,155	2,155	13,6	13,6	11,5	15,0
k_2	0,848	0,769	0,600	0,600	0,6	0,6	0,6	0,5
k_3	-0,400	-0,324	0	0	-	-	-	-
σ_3	35	20	35	20	35	20	35	20
q	70	40	70	40	70	40	70	40
σ_1	105	60	105	60	105	60	105	60
σ_2	35	20	35	20	35	20	35	20
I_1	175	100	175	100	-	-	-	-
τ_{oct}	33,0	18,9	33,0	18,9	-	-	-	-
M_r (MPa) ^c	351,3	152,2	301,6	215,6	301,6	215,5	255,0	150,0
M_r (MPa) ^d	350	150	300	215	300	215	250	150

^a État des contraintes pour fondation

^b État des contraintes pour sous-fondation

^c Module réversible calculé

^d Module réversible à utiliser

Dans le cas des matériaux de fondation, la valeur de M_r est sensible à l'épaisseur de la couche d'enrobé. Par conséquent, une valeur de module réversible sera considérée pour les matériaux de fondation, mais elle sera également définie pour différentes valeurs d'épaisseur de la couche d'enrobés bitumineux. Le calcul du module réversible pour les couches de fondation a été effectué avec le logiciel i3CME (Université Laval, 2019). Ce logiciel permet de calculer le module des couches granulaires en utilisant l'équation (35) en subdivisant l'épaisseur de la couche pour améliorer la précision. Dans cette analyse, les structures des sections de référence sont utilisées comme base pour la définition des épaisseurs de chaque couche de la chaussée. Les matériaux les plus fréquents d'enrobés bitumineux, de la fondation et de la sous-fondation (type et épaisseur) sont utilisés dans la simulation. Un sol SM (sable silteux) est considéré comme un sol typique. Pour simplifier, les modules de l'enrobé bitumineux, de la sous-fondation et du sol sont supposés constants.

ESG10 et MG112 sont les matériaux de couche d'asphalte et de sous-fondation les plus fréquents dans la base de données et seront utilisés dans les simulations. Les matériaux MG20 et MG56 seront sélectionnés en tant que matériau de fondation, en utilisant les paramètres k_1 , k_2 et k_3 du Tableau 1. Les épaisseurs des couches ont été choisies à partir de la distribution de fréquence des épaisseurs pour chaque type de couche, en utilisant le percentile 75 % pour les épaisseurs des couches de fondation et de sous-fondation. La Figure 1 montre la fréquence cumulée des épaisseurs dans chaque matériau.

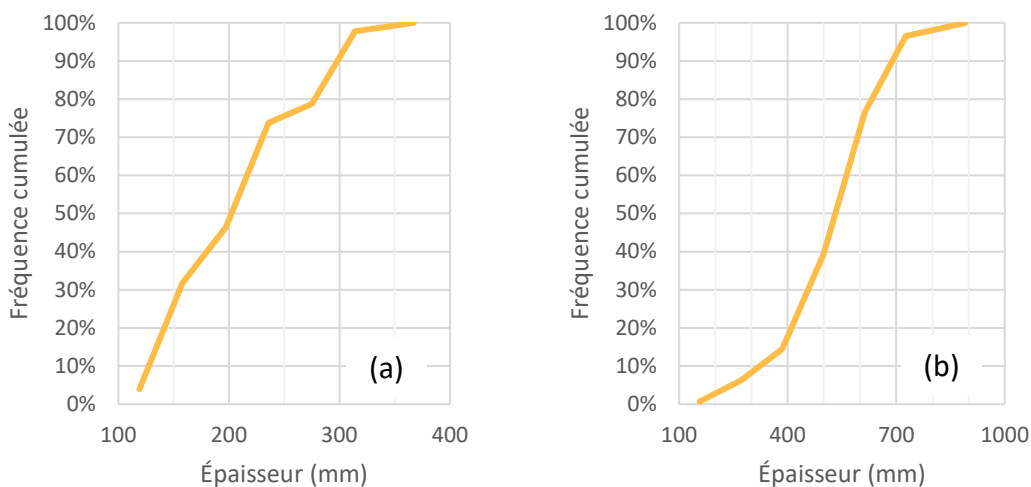


Figure 1. Fréquence cumulée des épaisseurs de couche (a) fondations, (b) sous-fondations

À partir des fréquences cumulées, les épaisseurs de 250 mm (percentile 75 %) pour la sous-fondation et de 600 mm (percentile 75 %) pour la sous-fondation ont été identifiées. Dans le cas de la couche d'enrobé, une gamme d'épaisseurs sera utilisée pour représenter les différentes conditions possibles dans la structure de la chaussée. Le Tableau 2 et le Tableau 3 montrent les M_r résultants de la simulation pour MG20 et MG56, respectivement. Le Tableau 4 indique la valeur du module à utiliser dans chaque condition, qui correspond aux modules moyens de la couche 2 (subdivisée en 2.1, 2.2 et 2.3).

Tableau 2. Module réversible pour MG20 avec différentes épaisseurs de couche d'asphalte (H_{AC})

Couche		$H_{AC} \leq 100$		$100 < H_{AC} < 150$		$150 < H_{AC} < 200$		$200 < H_{AC} < 250$		$250 \leq H_{AC}$	
		H	Er	H	Er	H	Er	H	Er	H	Er
1	ESG-10	70	2907	120	2907	170	2907	220	2907	270	2907
2.1	MG20	60	522	60	374	60	262	60	171	60	143
2.2	MG20	90	391	90	305	90	187	90	148	90	136
2.3	MG20	100	367	100	223	100	151	100	140	100	130
3	MG112	600	150	600	150	600	150	600	150	600	150
4	SM	-	69	-	69	-	69	-	69	-	69

H = Épaisseur (mm), Er = Module (MPa)

Tableau 3. Module réversible pour MG56 avec différentes épaisseurs de couche d'asphalte (H_{AC})

Couche		$H_{AC} \leq 100$		$100 < H_{AC} < 150$		$150 < H_{AC} < 200$		$200 < H_{AC} < 250$		$250 \leq H_{AC}$	
		H	Er	H	Er	H	Er	H	Er	H	Er
1	ESG-10	70	2907	120	2907	170	2 907	220	2907	270	2907
2.1	MG56	60	486	60	340	60	250	60	177	60	158
2.2	MG56	90	374	90	278	90	199	90	162	90	148
2.3	MG56	100	324	100	223	100	161	100	148	100	140
3	MG112	600	150	600	150	600	150	600	150	600	150
4	SM	-	69	-	69	-	69	-	69	-	-

H = Épaisseur (mm), Er = Module (MPa)

Tableau 4. Module réversible pour MG20 et MG56 avec différentes épaisseurs de couche d'asphalte (H_{AC})

Matériau	$H_{AC} \leq 100$	$100 < H_{AC} < 150$	$150 < H_{AC} < 200$	$200 < H_{AC} < 250$	$250 \leq H_{AC}$
MG 20	425 MPa	300 MPa	200 MPa	150 MPa	135 MPa
MG 56	395 MPa	280 MPa	200 MPa	160 MPa	145 a

C.3 Granulométrie

Le guide de l'ATC-ATC (TAC-ATC, 2020) fournit des granulométries pour les matériaux MG20 et MG112. Celles-ci seront utilisées telles qu'elles sont présentées dans cette référence. Dans le cas du MG56, une granulométrie hypothétique sera générée à partir des limites granulométriques décrites dans la spécification BNQ 2560-114 (BNQ, 2002a). Une granulométrie proche de la limite inférieure de cette limite sera considérée pour un matériau de fondation (matériau grossier), et une granulométrie proche de la limite supérieure comme une granulométrie de sous-fondation (matériau plus fin). Ceci est fait afin de représenter la différence de caractéristiques entre les matériaux de fondation et de sous-fondation. La Figure 2 et le Tableau 5 montrent la distribution des tailles de particules définies pour représenter le MG56.

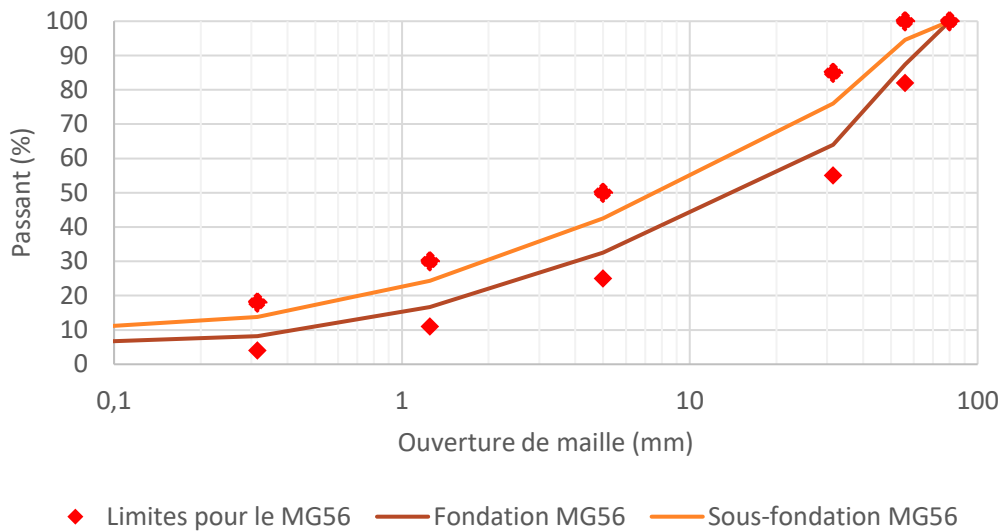


Figure 2. Granulométrie proposée pour représenter le MG56

Tableau 5. Granulométrie proposée pour représenter le MG56

Ouverture de maille (mm)	Passant cumulé	
	Fondation	Sous-fondation
25	72%	60%
19	66%	55%
14	60%	48%
10	55%	42%
5	43%	33%
1,25	24%	17%
0,08	4%	3%

Dans le cas des matériaux recyclés, la définition de la granulométrie adéquate est plus complexe puisque sa granulométrie finale dépendra de la technique de recyclage utilisée et de la proportion entre les matériaux. Pour la définition de cette granulométrie, il a été décidé de considérer les proportions de matériaux liées à la classification de chaque matériau, en utilisant comme référence la Figure 3 de la norme BNQ 2560-600 (BNQ, 2002b).

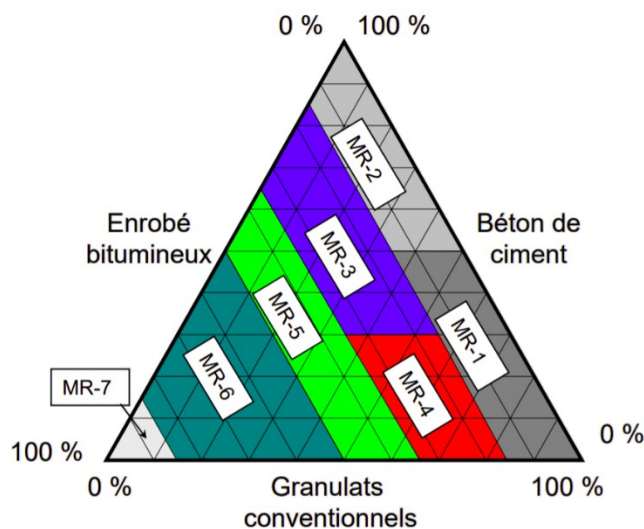


Figure 3. Classification des matériaux recyclés (MR) (BNQ, 2002b)

Pour les matériaux associés aux différentes proportions du MR, on utilisera la granulométrie d'un ESG-10 pour l'enrobé bitumineux, d'un MG20 pour les granulats conventionnels, et une granulométrie hypothétique pour le béton de ciment. Les proportions de chaque matériau utilisé pour définir les granulométries sont indiquées dans le Tableau 6. Le Tableau 7 montre les granulométries résultantes, et la Figure 4 montre les courbes granulométriques proposées, qui sont comparées aux limites d'un MG20.

Tableau 6. Proportions des matériaux constitutifs dans les MR

	MR, type 1	MR, type 2	MR, type 4	MR, type 5
Béton de ciment (BC)	0%	50%	30%	0%
Enrobé bitumineux (EB)	30%	15%	15%	50%
Granulats conventionnels (GC)	70%	35%	55%	50%

Tableau 7. Granulométrie proposée pour représenter les MR

Maille (mm)	Passant						
	BC ^a	EB ^b	GC ^c	MR-1 ^d	MR-2 ^d	MR-4 ^d	MR-5 ^d
25	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
19	100%	100%	94%	96%	98%	97%	95%
14	100%	98%	77%	83%	92%	87%	80%
10	90%	96%	61%	72%	81%	75%	66%
5	60%	58%	37%	43%	52%	47%	40%
1,25	38%	18%	15%	16%	27%	22%	15%
0,08	3%	5%	4%	4%	4%	4%	4%

^a Matériau hypothétique, ^b ESG-10, ^c MG-20

^d Résultat de la combinaison des agrégats en utilisant les proportions du Tableau 67.

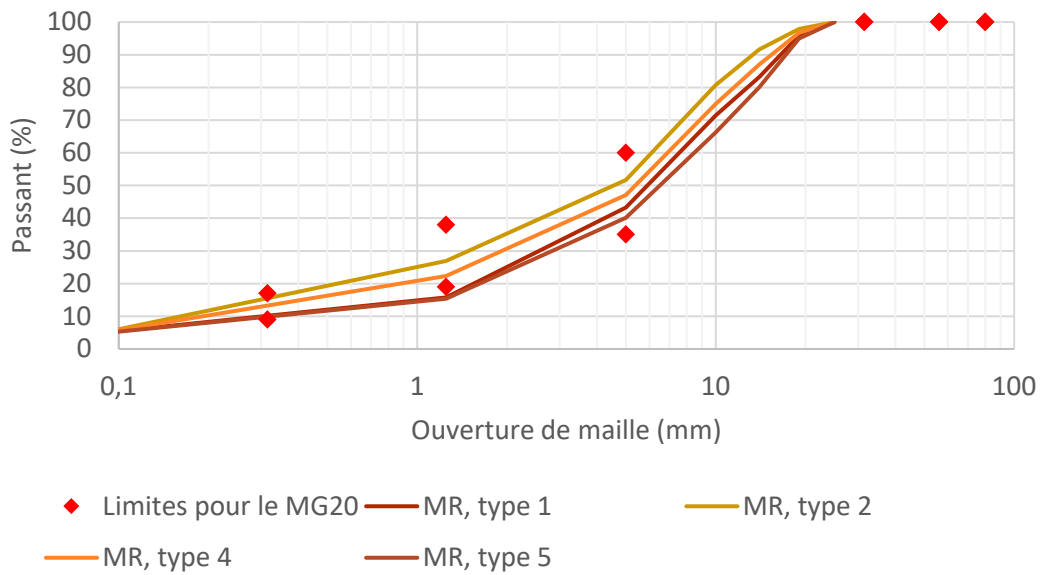


Figure 4. Granulométrie proposée pour représenter les MR

C.4. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du MG20 et du MG112 sont indiquées dans le guide TAC-ATC. Pour le reste des matériaux, la base de données du logiciel Chaussée2 du MTMD a été utilisée comme référence. Les propriétés sélectionnées sont résumées dans le Tableau 26 et le Tableau 29.

ANNEXE D

CORRESPONDANCE ENTRE LE DÉPÔT ET LE SOL

Validation de la méthode de classification des sols

RTSS	Classification selon le Tableau 31	Description	Classification sur le terrain	Source
00055-03-071-000D	A-2-4	Sables et graviers à haute teneur en fines	SP-SM	Vaillancourt (2004)
00155-03-121-000C	A-7	Argile à haute compression	Argile (CL)	Bourgie, Doré (2001)
00161-02-161-000C	A-4	Sols de limon sableux	Till (ML)	Juneau (2001)
00175-03-019-000G	A-4	Sols de limon sableux	SM-SC	Drouin (2005)
00175-03-036-000G	A-4	Sols de limon sableux	SM-SC	Drouin (2005)
00175-03-072-000D	A-4	Sols de limon sableux	GW	Drouin (2005)

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00005-01-052-000D	14.96	15.83	45.615	-75.917	Loameuse-fine	Mixte sableux	26	58	16	74	LL<40	IP<10	A-4	
00005-01-052-000D	8.46	10.67	45.573	-75.873	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Sableux	Siliceuse				0	0			
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00005-01-052-000G	10.82	14.28	45.589	-75.891	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00005-01-052-000G	8.5	10.82	45.572	-75.874	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00010-01-040-000G	0	0	45.463	-73.456										
00010-02-120-000G	0	0.35	45.364	-72.934										
00015-01-013-000D	3.04	3.89	45.094	-73.468	Loameuse	Mixte sableux	47	38	15	53	LL<40	IP<10	A-4	
00015-01-013-000G	3.02	3.89	45.363	-72.93	Squelettique-loameux	Mixte sableux	51	30	19	49	LL<40	IP<10	A-4	
00015-01-040-000D	7.34	9.22	45.263	-73.468	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00015-01-053-000D	0	1.4	45.281	-73.476	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00015-01-055-000D	2.4	4.71	45.312	-73.499	Argileuse-très fine	Mixte argileux	6	39	55	94	LL>=40	IP>=10	A-7	
00015-01-055-000D	0	2.4	45.293	-73.484	Sableux	Mixte sableux	83	12	5	17	LL<40	IP<10	A-2-4	
00015-03-153-000G	0	0	45.94	-74.129										

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00020-01-025-000D	7.84	8.58	45.266	-74.223	Squelettique-loameux	Mixte sableux	54	34	12	46	LL<40	IP<10	A-4	
00020-01-025-000D	7.84	8.58	45.266	-74.223	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	40	5	45	LL<40	IP<10	A-4	
00020-01-025-000G	7.84	8.58	45.266	-74.223	Squelettique-loameux	Mixte sableux	54	34	12	46	LL<40	IP<10	A-4	
00020-01-025-000G	7.84	8.58	45.266	-74.223	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	40	5	45	LL<40	IP<10	A-4	
00020-01-040-000G	0	0.61	45.271	-74.217	Squelettique-loameux	Mixte sableux	54	34	12	46	LL<40	IP<10	A-4	
00020-01-040-000G	0	0.61	45.271	-74.217	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	40	5	45	LL<40	IP<10	A-4	
00020-02-010-000G	0	0	45.405	-73.954	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4
00020-02-010-000G	0	0	45.405	-73.954	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-02-010-000G	0	0	45.405	-73.954	Loameuse-grossière	Mixte sableux	34	48	18	66	LL<40	IP<10	A-4	
00020-05-120-000G	0.6	1.2	46.38	-71.855	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-06-250-000G	0	0	47.041	-70.407	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00020-06-250-000G	0	0	47.041	-70.407	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00020-06-250-000G	0	0	47.041	-70.407	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00020-07-210-000D	0	0	47.615	-69.73	Organique	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00020-08-105-000G	5.15	3.47	47.904	-69.481	Squelettique-sableux	Mixte sableux	72	15	13	28	LL<40	IP<10	A-2-4	A-4
00020-08-105-000G	5.15	3.47	47.904	-69.481	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-4
00020-08-140-000C	0.42	2.04	47.988	-69.382	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00020-08-140-000C	0.42	2.04	47.988	-69.382	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-4

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Argileuse-très fine	Mixte argileux	2	15	83	98	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Sableux	Mixte sableux	77	12	11	23	LL<40	IP<10	A-2-4	
00020-08-140-000C	8.57	10.19	47.999	-69.34	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00020-08-140-000C	12.18	13.8	48.042	-69.283	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00020-08-140-000C	12.18	13.8	48.042	-69.283	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00020-08-140-000C	12.18	13.8	48.042	-69.283	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00020-09-095-000C	0.53	4.66	48.491	-68.447										A-4
00020-09-117-000C	0	2.94	48.515	-68.406										
00020-09-117-000C	2.94	7.65	48.532	-68.375										A-4
00020-09-117-000C	7.65	11.58	48.553	-68.319	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00020-09-120-000C	0	4.36	48.57	-68.272	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00020-09-130-000G	0	1.15	48.591	-68.222	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00025-01-082-000G	2.04	2.7	45.707	-73.65	Organique	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00025-01-082-000G	2.04	2.7	45.707	-73.65	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00025-01-150-000D	0	0	45.883	-73.658	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00025-01-150-000D	0	0	45.883	-73.658	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4
00025-01-150-000G	0	0	45.883	-73.659	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	
00025-01-150-000G	0	0	45.883	-73.659	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	A-2-4
00035-01-035-000D	19	22.53	45.272	-73.209	Loameuse	Mixte sableux	47	38	15	53	LL<40	IP<10	A-4	
00035-01-035-000D	15.52	19	45.251	-73.183	Loameuse-grossière	Mixte sableux	48	40	12	52	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00035-01-035-000D	12.46	15.52	45.237	-73.149	Loameuse	Mixte sableux	47	38	15	53	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00035-01-035-000D	4	8	45.168	-73.128	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	A-4
00035-01-035-000D	8	12.46	45.204	-73.128	Loameuse	Mixte sableux	47	38	15	53	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00035-01-035-000D	0	4	45.132	-73.127	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00035-01-035-000G	20	22.87	45.28	-73.213	Argileuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00035-01-035-000G	16	20	45.252	-73.188	Loameuse-grossière	Mixte sableux	48	40	12	52	LL<40	IP<10	A-4	
00035-01-035-000G	8	12	45.203	-73.129	Loameuse	Mixte sableux	47	38	15	53	LL<40	IP<10	A-4	
00035-01-035-000G	4	8	45.167	-73.128	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00035-01-035-000G	0	4	45.131	-73.127	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00035-01-035-000G	0	4	45.131	-73.127	Sableux	Mixte sableux	86	14	0	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00035-01-035-000G	0	4	45.131	-73.127	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00035-02-053-000D	0	0	45.353	-73.288										
00035-02-053-000G	3.5	3.6	45.354	-73.288										

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00040-04-010-000D	0	2.41	45.707	-73.509	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-04-010-000D	0	2.41	45.707	-73.509	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-4
00040-04-010-000D	0	2.41	45.707	-73.509	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-7
00040-04-010-000D	0	2.41	45.707	-73.509	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	A-7
00040-06-090-000D	0	3.22	46.465	-72.378	Sableux	Mixte sableux	89	5	6	11	LL<40	IP>=10	A-2-6	
00040-06-100-000G	0	0.31	46.479	-72.341	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-100-000G	0	0.31	46.479	-72.341	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00040-06-100-000G	0.54	1.96	46.48	-72.336	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00040-06-100-000G	0.54	1.96	46.48	-72.336	Loameuse-grossière	Mixte sableux	42	43	15	58	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00040-06-110-000D	1.01	2	46.51	-72.296	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-110-000D	1.01	2	46.51	-72.296	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	A-4
00040-06-120-000D	0.53	1.63	46.522	-72.287	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-120-000D	0.53	1.63	46.522	-72.287	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00040-06-120-000D	0.53	1.63	46.522	-72.287	Loameuse-grossière	Mixte sableux	20	61	19	80	LL<40	IP<10	A-4	
00040-06-120-000D	0.53	1.63	46.522	-72.287	Limoneuse-fine	Mixte sableux	10	65	25	90	LL<40	IP<10	A-4	
00040-06-120-000D	1.63	2.59	46.531	-72.28	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-120-000D	1.63	2.59	46.531	-72.28	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	A-4
00040-06-130-000D	0	2.05	46.539	-72.274	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-130-000D	0	2.05	46.539	-72.274	Loameuse-grossière	Mixte sableux	20	55	25	80	LL<40	IP<10	A-4	A-4

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00040-06-130-000D	0	2.05	46.539	-72.274	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-140-000D	0	3.4	46.552	-72.256	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-140-000D	0	3.4	46.552	-72.256	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00040-06-140-000D	0	3.4	46.552	-72.256	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-4
00040-06-140-000D	0	3.4	46.552	-72.256	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	A-4
00040-06-140-000D	3.4	3.79	46.574	-72.224	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00040-06-140-000D	3.4	3.79	46.574	-72.224	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00040-06-140-000D	3.4	3.79	46.574	-72.224	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00040-06-140-000D	3.4	3.79	46.574	-72.224	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00040-06-150-000D	0	0.51	46.576	-72.221	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00040-06-150-000D	0	0.51	46.576	-72.221	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-2-4
00040-06-150-000D	0	0.51	46.576	-72.221	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00040-06-150-000D	0	0.51	46.576	-72.221	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00040-06-150-000D	0.75	1.05	46.581	-72.214	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-150-000D	0.75	1.05	46.581	-72.214	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-150-000D	0.75	1.05	46.581	-72.214	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-150-000D	1.05	1.6	46.583	-72.211	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-150-000D	1.05	1.6	46.583	-72.211	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-150-000D	1.05	1.6	46.583	-72.211	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00040-06-150-000D	1.6	2.65	46.586	-72.206	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00040-06-150-000D	1.6	2.65	46.586	-72.206	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00040-06-150-000D	1.6	2.65	46.586	-72.206	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Sableux	Siliceuse				0	0			A-2-4
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-011-000D	9.04	9.83	45.553	-75.424	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Sableux	Siliceuse				0	0			A-2-4
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-011-000G	9.7	10.07	45.553	-75.424	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-02-062-000C	0.15	2.44	45.625	-75.24	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00050-02-071-000D	0	2.4	45.627	-75.202	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00050-02-071-000G	0	2.39	45.627	-75.202	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Sableux	Siliceuse				0	0			A-2-4
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-7
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	A-7
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-085-000D	0	2.5	45.641	-75.166	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Sableux	Siliceuse				0	0			
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-7
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-085-000G	0	2.5	45.641	-75.166	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-092-000C	0.36	5.35	45.646	-75.131	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00050-02-092-000C	5.39	9.53	45.646	-75.066	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-02-101-000D	0	2.25	45.665	-75.009	Loameuse-grossière	Mixte sableux	51	40	9	49	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-101-000D	0	2.25	45.665	-75.009	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Sableux	Siliceuse				0	0			A-2-4
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	A-2-4
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-101-000D	2.98	4.71	45.671	-74.971	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Squelettique-sableux	Mixte sableux	58	33	9	42	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Sableux	Siliceuse				0	0			A-4
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Argileuse-fine	Mixte argileux	10	63	27	90	LL>=40	IP<10	A-5	A-4
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Squelettique-loameux	Mixte sableux	45	37	18	55	LL<40	IP<10	A-4	
00050-02-101-000G	2.98	4.74	45.671	-74.971	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00050-02-101-000G	4.85	7	45.674	-74.948	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00050-02-101-000G	4.85	7	45.674	-74.948	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00050-02-101-000G	4.85	7	45.674	-74.948	Sableux	Mixte sableux	89	8	3	11	LL<40	IP<10	A-2-4	
00050-02-101-000G	4.85	7	45.674	-74.948	Loameuse-grossière	Mixte sableux	35	49	16	65	LL<40	IP<10	A-4	A-4

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00050-03-010-000C	17.66	20.77	45.653	-74.803	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	A-7
00050-03-010-000C	17.66	20.77	45.653	-74.803	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	26	71	97	LL>=40	IP>=10	A-7	A-7
00050-03-010-000C	17.66	20.77	45.653	-74.803	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00050-03-020-000C	0	3.99	45.65	-74.544	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-7
00050-03-020-000C	0	3.99	45.65	-74.544	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-03-040-000D	0	2.3	45.632	-74.41	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	
00050-03-040-000D	0	2.3	45.632	-74.41	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00050-03-040-000G	0	0.97	45.632	-74.41	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	
00050-03-040-000G	0	0.97	45.632	-74.41	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	A-7
00050-04-013-000C	8	10.05	45.678	-74.177	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	A-7
00050-04-013-000C	8	10.05	45.678	-74.177	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00050-04-013-000C	8	10.05	45.678	-74.177	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	A-7
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Argileuse-fine	Mixte argileux	18	33	49	82	LL>=40	IP>=10	A-7	
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Loameuse-grossière	Siliceuse				0	0			A-4
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Sableux	Mixte sableux	81	11	8	19	LL<40	IP<10	A-2-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00050-04-013-000C	12.78	14.83	45.684	-74.116	Organique	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00055-01-031-000G	0.67	1.83	45.008	-72.088	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00055-01-031-000G	0.67	1.83	45.008	-72.088	Squelettique-sableux	Mixte sableux	80	16	4	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00055-03-071-000D	2	4	45.83	-72.452	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	A-7
00055-03-071-000D	2	4	45.83	-72.452	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00055-03-071-000D	2	4	45.83	-72.452	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00055-03-071-000D	0	2	45.819	-72.432	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	A-5
00055-03-071-000D	0	2	45.819	-72.432	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-5
00055-03-071-000D	0	2	45.819	-72.432	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	A-5
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-5
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	A-5
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-5
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	A-5
00055-04-112-000D	1.78	3.06	46.274	-72.506	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-2-4
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00055-04-112-000D	0	1.75	46.263	-72.49	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00055-04-112-000G	3.03	3.03	46.282	-72.518	Limoneuse-fine	Mixte sableux	38	37	25	62	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00055-04-112-000G	3.03	3.03	46.282	-72.518	Limoneuse-fine	Mixte sableux	38	37	25	62	LL<40	IP<10	A-4	A-2-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-2-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00055-04-112-000G	0	3.03	46.263	-72.49	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	A-4
00070-01-083-000D	0.91	1.81	48.423	-71.346	Limoneuse-fine	Mixte sableux	27	38	25	63	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00070-01-083-000G	0.91	1.81	48.423	-71.345	Limoneuse-fine	Mixte sableux	27	38	25	63	LL<40	IP<10	A-4	
00070-01-083-000G	4.89	5.8	48.412	-71.328	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00070-01-083-000G	4.89	5.8	48.412	-71.328	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00070-01-083-000G	4.89	5.8	48.412	-71.328	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00070-01-083-000G	7.63	8.54	48.395	-71.268	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00070-01-083-000G	7.63	8.54	48.395	-71.268	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00070-01-083-000G	7.63	8.54	48.395	-71.268	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Loameuse-grossière	Ne s'applique pas				0	0			A-4
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Loameuse-fine	Mixte sableux	35	48	17	65	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-5
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			A-5
00073-01-090-000D	0	3.04	46.172	-70.687	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-5
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Loameuse-grossière	Ne s'applique pas				0	0			
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Loameuse-fine	Mixte sableux	35	48	17	65	LL<40	IP<10	A-4	A-4
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			A-4
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-090-000G	0	3.43	46.172	-70.688	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00073-01-099-000D	4	7.55	46.232	-70.748	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			A-4
00073-01-099-000D	4	7.55	46.232	-70.748	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00073-01-107-000D	9.43	10.5	46.309	-70.858	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			A-2-4
00073-01-107-000D	9.43	10.5	46.309	-70.858	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000D	9.43	10.5	46.309	-70.858	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000D	9.43	10.5	46.309	-70.858	Loameuse-grossière	Mixte sableux	43	42	15	57	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-107-000D	0	1.9	46.252	-70.783	Sableux	Ne s'applique pas				0	0			
00073-01-107-000G	8.22	9.43	46.302	-70.848	Loameuse-grossière	Mixte sableux	41	38	21	59	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Limoneuse-fine	Mixte sableux	26	60	14	74	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000G	4.22	6.12	46.284	-70.805	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-107-000G	0	1.9	46.251	-70.784	Sableux	Ne s'applique pas				0	0			
00073-01-132-000D	11.03	12.09	46.405	-70.921	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000D	11.03	12.09	46.405	-70.921	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000D	11.03	12.09	46.405	-70.921	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000D	11.03	12.09	46.405	-70.921	Loameuse-grossière	Mixte sableux	43	42	15	57	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-132-000D	6.83	11.03	46.376	-70.888	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00073-01-132-000D	6.83	11.03	46.376	-70.888	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-132-000G	10.81	8.2	46.403	-70.919	Loameuse-grossière	Mixte sableux	41	38	21	59	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-132-000G	8.04	3	46.318	-70.864	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000G	8.04	3	46.318	-70.864	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000G	8.04	3	46.318	-70.864	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-132-000G	8.04	3	46.318	-70.864	Loameuse-grossière	Mixte sableux	43	42	15	57	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-156-000D	7.5	10.47	46.449	-71.012	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00073-01-156-000D	3.54	5.2	46.427	-70.971	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	
00073-01-156-000D	0	3.54	46.411	-70.931	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-010-000D	12.87	14.16	47.54	-68.627	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-010-000D	8.38	12.82	47.529	-68.57	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00085-01-010-000D	7.21	8.38	47.527	-68.555	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00085-01-010-000D	3.77	7.18	47.504	-68.526	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00085-01-010-000D	0	3.74	47.485	-68.484	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00085-01-010-000G	12.87	14.14	47.539	-68.627	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-010-000G	8.51	12.82	47.529	-68.572	Organique	Ne s'applique pas				0	0			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00085-01-010-000G	7.19	8.51	47.527	-68.555	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00085-01-010-000G	3.79	7.16	47.503	-68.527	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00085-01-010-000G	0	3.76	47.485	-68.485	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.81	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.81	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.81	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.81	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	15.41	21.43	47.616	-68.81	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	4.65	13.68	47.565	-68.699	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000D	0.81	4.65	47.547	-68.656	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.81	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.81	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.81	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.81	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00085-01-040-000G	17.01	21.43	47.616	-68.81	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	9.2	13.63	47.59	-68.74	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	9.2	13.63	47.59	-68.74	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	9.2	13.63	47.59	-68.74	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-040-000G	9.2	13.63	47.59	-68.74	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	9.2	13.63	47.59	-68.74	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	4.88	9.2	47.566	-68.701	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	4.88	9.2	47.566	-68.701	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00085-01-040-000G	4.88	9.2	47.566	-68.701	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-040-000G	0.53	4.88	47.546	-68.653	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-050-000D	11.7	12.25	47.673	-68.962	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00085-01-050-000G	0.04	0.55	47.669	-68.868	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00085-01-145-000D	0	2.19	47.797	-69.486	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00104-04-031-000C	0.51	1.35	45.4	-73.453	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00104-04-031-000C	2.89	3.74	45.394	-73.435	Argileuse-très fine	Mixte argileux	6	39	55	94	LL>=40	IP>=10	A-7	
00104-07-060-000C	0	0	45.243	-72.885	Sableux	Mixte sableux	59	31	10	41	LL<40	IP<10	A-4	
00104-07-090-000C	0	0	45.221	-72.837	Squelettique-loameux	Mixte sableux	54	34	12	46	LL<40	IP<10	A-4	
00104-07-090-000C	0	0	45.221	-72.837	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	40	5	45	LL<40	IP<10	A-4	
00104-07-090-000C	2.7	5.11	45.21	-72.807	Squelettique-loameux	Mixte sableux	54	34	12	46	LL<40	IP<10	A-4	
00104-07-090-000C	2.7	5.11	45.21	-72.807	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	40	5	45	LL<40	IP<10	A-4	
00105-01-121-000C	4.58	6.12	45.718	-75.914	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00105-01-121-000C	4.58	6.12	45.718	-75.914	Argileuse	Mixte argileux				0	LL>=40			
00105-02-030-000C	6.5	8.26	46.001	-76.044	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Limoneuse-fine	Mixte sableux	26	60	14	74	LL<40	IP<10	A-4	
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-01-165-000C	0.55	1.57	45.369	-71.818	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Loameuse-grossière	Ne s'applique pas				0	0			
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Loameuse-fine	Mixte sableux	35	48	17	65	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00108-02-115-000C	0	0.31	45.954	-70.933	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00112-01-061-000D	0.57	1.42	45.503	-73.489	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00112-01-061-000D	0.57	1.42	45.503	-73.489	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00112-01-061-000D	0.57	1.42	45.503	-73.489	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
00112-01-061-000D	1.42	2.84	45.505	-73.47	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00112-01-061-000D	1.42	2.84	45.505	-73.47	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00112-01-061-000D	1.42	2.84	45.505	-73.47	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
00112-01-061-000D	2.84	3.7	45.507	-73.452	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00112-01-061-000G	0.57	1.42	45.504	-73.489	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00112-01-061-000G	0.57	1.42	45.504	-73.489	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00112-01-061-000G	0.57	1.42	45.504	-73.489	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
00112-01-061-000G	1.42	2.84	45.505	-73.471	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00112-01-061-000G	1.42	2.84	45.505	-73.471	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
00112-01-061-000G	1.42	2.84	45.505	-73.471	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
00112-01-061-000G	2.84	3.7	45.507	-73.453	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00113-03-080-000C	0	0	49.816	-75.458										
00116-01-200-000G	4.72	5.52	45.539	-73.255	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00116-03-070-000C	0	1.72	46.096	-71.925										
00116-03-085-000C	0.63	2.53	46.114	-71.91										
00116-03-085-000C	3.7	4.48	46.134	-71.895	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00116-03-085-000C	3.7	4.48	46.134	-71.895	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00116-03-085-000C	5.21	6.19	46.152	-71.887	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00116-03-085-000C	5.21	6.19	46.152	-71.887	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00116-03-261-000C	0	2.98	46.421	-71.576	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-261-000C	0	2.98	46.421	-71.576	Loameuse-grossière	Mixte sableux	28	58	14	72	LL<40	IP<10	A-4	
00116-03-261-000C	2.98	4.2	46.443	-71.555	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-280-000C	2.4	4.7	46.471	-71.525	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-291-000C	1.54	3.96	46.508	-71.486	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Argileuse-très fine	Mixte argileux	1	23	76	99	LL>=40	IP>=10	A-7	
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Loameuse-grossière	Mixte sableux	48	32	20	52	LL<40	IP<10	A-4	
00116-03-291-000C	4	6.1	46.537	-71.456	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Argileuse-très fine	Mixte argileux	1	23	76	99	LL>=40	IP>=10	A-7	
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Loameuse-grossière	Mixte sableux	48	32	20	52	LL<40	IP<10	A-4	
00116-03-361-000C	2.96	3.9	46.624	-71.363	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-092-000G	3.2	5.5	46.111	-74.423	Sableux	Mixte sableux	79	14	7	21	LL<40	IP<10	A-2-4	
00117-03-092-000G	3.2	5.5	46.111	-74.423	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-092-000G	3.2	5.5	46.111	-74.423	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-092-000G	0.45	3.2	46.104	-74.388	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00117-03-092-000G	0.45	3.2	46.104	-74.388	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-092-000G	0.45	3.2	46.104	-74.388	Squelettique-sableux	Mixte sableux	80	16	4	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00117-03-120-000D	0.45	1.8	46.115	-74.47	Sableux	Mixte sableux	79	14	7	21	LL<40	IP<10	A-2-4	
00117-03-120-000D	0.45	1.8	46.115	-74.47	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-120-000D	0.45	1.8	46.115	-74.47	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-120-000G	0.29	1.81	46.114	-74.469	Sableux	Mixte sableux	79	14	7	21	LL<40	IP<10	A-2-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00117-03-120-000G	0.29	1.81	46.114	-74.469	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-03-120-000G	0.29	1.81	46.114	-74.469	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00117-07-040-000C	13.2	17.91	46.97	-76.464										
00117-07-040-000C	9.2	13.2	46.942	-76.432										
00117-07-040-000C	5.2	9.2	46.907	-76.421										
00117-07-050-000C	11	13.86	47.081	-76.546										
00117-07-050-000C	3.54	4.65	47.023	-76.537										
00117-07-050-000C	0	3.54	47	-76.506										
00117-07-060-000C	2.5	7	47.111	-76.596										
00117-07-060-000C	0	2.5	47.094	-76.576										
00117-09-095-000C	11.5	11.84	48.223	-78.964										
00122-01-033-000C	1.48	2.43	45.921	-72.756	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00122-01-033-000C	1.48	2.43	45.921	-72.756	Argileuse	Mixte argileux	72	16	12	28	LL>=40	IP<10	A-2-5	
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00122-01-041-000C	0.14	3.74	45.919	-72.742	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00122-01-051-000C	0	0.65	45.917	-72.696	Loameuse-grossière	Mixte sableux	55	34	11	45	LL<40	IP<10	A-4	
00122-01-051-000C	0	0.65	45.917	-72.696	Loameuse-grossière	Mixte sableux	38	47	15	62	LL<40	IP<10	A-4	
00122-01-263-000C	2.5	3.37	46.031	-72.073	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00122-01-263-000C	2.5	3.37	46.031	-72.073	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00122-01-263-000C	2.5	3.37	46.031	-72.073	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00122-01-273-000C	0	1.58	46.034	-72.063	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00122-01-273-000C	0	1.58	46.034	-72.063	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00132-03-110-000D	0.59	0.59	45.384	-73.542										
00132-03-110-000D	0.59	2	45.382	-73.536										
00132-03-110-000G	0.59	0.59	45.384	-73.542										
00132-03-110-000G	0.59	2	45.382	-73.535										
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378	Argileuse-fine	Mixte argileux	2	44	54	98	LL>=40	IP>=10	A-7	
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378	Limoneuse-fine	Mixte sableux	34	52	14	66	LL<40	IP<10	A-4	
00132-12-095-000C	2.74	3.32	47.999	-69.378	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00132-14-015-000C	5.34	6.79	48.637	-68.171	Squelettique-sableux	Mixte sableux	86	6	8	14	LL<40	IP>=10	A-2-6	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00132-15-090-000C	0.52	1.62	49.226	-65.987										
00132-15-120-000C	6.63	7.08	49.257	-65.563										
00132-17-185-000C	3.22	4.37	48.334	-64.739										
00132-18-175-000C	3.83	4.3	48.199	-65.88	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00132-19-102-000C	6.41	8.51	48.115	-66.495										
00132-19-102-000C	3.96	6.41	48.127	-66.468										
00132-19-102-000C	0.9	3.46	48.138	-66.431										
00132-19-107-000C	1.28	4.2	48.056	-66.576										
00132-20-312-000C	0.23	1.81	48.595	-68.21	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00133-02-135-000C	6.28	7.19	45.779	-73.164										
00133-02-155-000C	0	0.7	45.786	-73.159										
00134-01-021-000G	0	0.35	45.393	-73.513										
00137-01-015-000C	0	0.59	45.786	-73.159										
00138-03-095-000C	2.96	6.2	45.929	-73.244	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00138-03-095-000C	2.96	6.2	45.929	-73.244	Loameuse-grossière	Mixte sableux	42	43	15	58	LL<40	IP<10	A-4	
00138-04-131-000C	6.65	7.33	46.287	-72.644	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00138-04-131-000C	6.65	7.33	46.287	-72.644	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00138-05-071-000C	5.09	6.51	46.492	-72.254	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00138-05-071-000C	5.09	6.51	46.492	-72.254	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00138-05-071-000C	5.09	6.51	46.492	-72.254	Loameuse-grossière	Mixte sableux	20	61	19	80	LL<40	IP<10	A-4	
00138-05-071-000C	5.09	6.51	46.492	-72.254	Limoneuse-fine	Mixte sableux	10	65	25	90	LL<40	IP<10	A-4	
00138-06-025-000C	7.21	7.82	46.597	-72.026	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00138-06-025-000C	7.21	7.82	46.597	-72.026	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00138-08-222-000C	9.92	11.88	48.065	-69.762	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00138-08-222-000C	9.92	11.88	48.065	-69.762	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00138-08-222-000C	11.97	12.44	48.08	-69.748	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	
00138-08-222-000C	11.97	12.44	48.08	-69.748	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00138-08-222-000C	11.97	12.44	48.08	-69.748	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00138-11-051-000C	0.21	3.41	50.3	-64.312										
00138-11-070-000C	13.83	14.34	50.305	-63.821										
00138-11-095-000C	13.3	14.78	50.262	-63.627										
00138-91-121-000C	1.56	2.81	48.592	-69.122										
00138-91-121-000C	2.81	5.42	48.602	-69.115										
00138-91-121-000C	5.42	7.09	48.625	-69.107										
00138-91-132-000C	2.5	5.42	48.689	-69.091										
00138-91-132-000C	0.7	2.5	48.666	-69.09										
00143-01-115-000C	3.19	4.26	45.264	-71.94	Loameuse-fine	Mixte sableux	37	52	11	63	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00148-03-021-000C	1.82	2.56	45.497	-75.957	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00148-03-021-000C	1.82	2.56	45.497	-75.957	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00148-03-021-000C	1.82	2.56	45.497	-75.957	Argileuse	Mixte argileux				0	LL>=40			
00148-03-021-000C	1.82	2.56	45.497	-75.957	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00148-03-021-000C	0	0	45.481	-75.954	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00148-06-021-000C	0.68	2	45.68	-74.19	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	
00148-06-021-000C	0.68	2	45.68	-74.19	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00148-06-021-000C	0.68	2	45.68	-74.19	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Argileuse-fine	Mixte argileux	18	33	49	82	LL>=40	IP>=10	A-7	
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Loameuse-grossière	Siliceuse				0	0			
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Sableux	Mixte sableux	81	11	8	19	LL<40	IP<10	A-2-4	
00148-06-021-000C	2	4	45.667	-74.172	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00148-06-021-000C	4	6.64	45.654	-74.155	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	
00148-06-021-000C	4	6.64	45.654	-74.155	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00148-06-021-000C	4	6.64	45.654	-74.155	Loameuse-grossière	Mixte sableux	34	48	18	66	LL<40	IP<10	A-4	
00155-03-121-000C	8.78	9.53	46.861	-72.8										
00155-03-132-000C	0	0.7	46.858	-72.809										
00155-03-160-000C	1.1	6.3	47.087	-72.918										
00155-03-160-000C	0	1.1	47.077	-72.917										
00155-03-160-000C	6.3	9.29	47.129	-72.895										
00155-03-160-000C	10.01	12.22	47.16	-72.88										
00155-03-192-000C	5.54	9.54	47.373	-72.783	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00155-03-192-000C	5.54	9.54	47.373	-72.783	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00155-03-192-000C	5.54	9.54	47.373	-72.783	Loameuse-grossière	Mixte sableux	20	61	19	80	LL<40	IP<10	A-4	
00155-03-192-000C	5.54	9.54	47.373	-72.783	Limoneuse-fine	Mixte sableux	10	65	25	90	LL<40	IP<10	A-4	
00155-03-192-000C	9.54	13.54	47.405	-72.764										
00155-04-011-000C	10.71	12.36	47.708	-72.521										
00155-04-050-000C	0.67	3.46	47.901	-72.436										
00155-04-060-000C	2.3	2.9	48.018	-72.31										
00155-04-060-000C	6.1	7.57	48.047	-72.287										
00155-04-070-000C	3.95	4.53	48.103	-72.244										
00155-04-070-000C	0	0	48.129	-72.23										
00155-04-112-000C	0	0	48.359	-72.106	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00157-01-021-000C	6.4	7.53	46.441	-72.618	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-021-000C	6.4	7.53	46.441	-72.618	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00157-01-042-000C	4.17	4.65	46.474	-72.665	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	4.17	4.65	46.474	-72.665	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00157-01-042-000C	4.17	4.65	46.474	-72.665	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	2.35	4.17	46.46	-72.643	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	2.35	4.17	46.46	-72.643	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00157-01-042-000C	2.35	4.17	46.46	-72.643	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	0.9	1.82	46.454	-72.635	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	0.9	1.82	46.454	-72.635	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00157-01-042-000C	0	0.9	46.449	-72.627	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00157-01-042-000C	0	0.9	46.449	-72.627	Sableux	Mixte sableux	88	10	2	12	LL<40	IP<10	A-2-4	
00157-01-042-000C	0	0.9	46.449	-72.627	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	0	0.9	46.449	-72.627	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00157-01-042-000C	0	0.9	46.449	-72.627	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00158-02-015-000C	0.73	2	45.838	-73.831	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00158-02-015-000C	0.73	2	45.838	-73.831	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00158-02-015-000C	2.99	4.5	45.842	-73.806	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00159-01-081-000C	3.7	4.1	46.632	-72.426	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	3.7	4.1	46.632	-72.426	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	3.7	4.1	46.632	-72.426	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	0	0.38	46.617	-72.386	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	0	0.38	46.617	-72.386	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	0	0.38	46.617	-72.386	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00159-01-081-000C	0	0.38	46.617	-72.386	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00161-02-161-000C	1.6	2.03	46.099	-72.23	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	48	45	93	LL<40	IP<10	A-4	
00161-02-161-000C	1.6	2.03	46.099	-72.23	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00161-02-161-000C	1.6	2.03	46.099	-72.23	Sableux	Mixte sableux	80	12	8	20	LL<40	IP<10	A-2-4	
00167-01-131-000C	1.58	2.28	49.147	-73.585										
00169-01-051-000C	4.4	4.8	48.124	-71.567										
00169-01-062-000C	7.09	8	48.238	-71.671										
00169-01-062-000C	3.63	5.66	48.21	-71.653										
00169-01-083-000C	3.49	6.73	48.289	-71.69	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00169-02-202-000C	0.56	2.49	48.551	-72.289	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00169-02-202-000C	0.56	2.49	48.551	-72.289	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00169-02-202-000C	0.56	2.49	48.551	-72.289	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00169-02-370-000C	0.24	0.57	48.435	-71.817	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00169-02-370-000C	0.24	0.57	48.435	-71.817	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00169-02-370-000C	0.24	0.57	48.435	-71.817	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00169-02-370-000C	0.24	0.57	48.435	-71.817	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00170-01-130-000C	12.91	13.73	48.297	-70.667	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00170-01-130-000C	12.91	13.73	48.297	-70.667	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00170-01-130-000C	9.95	12.91	48.28	-70.636	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00170-01-130-000C	9.95	12.91	48.28	-70.636	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00172-01-101-000C	6.9	7.76	48.427	-70.665	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00172-01-101-000C	6.9	7.76	48.427	-70.665	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00173-01-155-000C	2.81	3.66	46.228	-70.799	Loameuse-grossière	Mixte sableux	24	66	10	76	LL<40	IP<10	A-4	
00175-03-019-000G	10.68	11.64	47.242	-71.229										
00175-03-019-000G	7.49	9.57	47.215	-71.224										
00175-03-019-000G	19.68	22.11	47.311	-71.183										
00175-03-036-000G	16.22	18.06	47.461	-71.23										
00175-03-036-000G	11.83	15.88	47.425	-71.204										
00175-03-036-000G	7.79	11.79	47.388	-71.191										
00175-03-036-000G	3.63	7.25	47.359	-71.19										
00175-03-036-000G	0	3.63	47.333	-71.177										

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00175-03-072-000D	6.28	7.35	47.561	-71.231										
00175-03-072-000G	10.91	11.99	47.597	-71.24										
00175-03-072-000G	14.66	15.17	47.634	-71.24										
00175-03-072-000G	6.36	7.43	47.562	-71.231										
00175-03-085-000D	2.14	3.34	47.639	-71.239										
00175-03-085-000D	5.36	5.82	47.681	-71.213										
00175-03-085-000G	4.5	5.36	47.675	-71.217										
00175-03-085-000G	8.66	9.2	47.675	-71.217										
00175-03-085-000G	13.69	14.23	47.756	-71.209										
00175-03-095-000G	3.34	3.67	47.639	-71.239										
00175-03-105-000G	8.19	8.49	47.756	-71.209										
00175-03-115-000D	0	0	47.912	-71.252										
00175-03-115-000D	5.5	6.67	47.949	-71.223										
00175-03-115-000D	10.21	10.95	47.981	-71.222										
00175-03-115-000G	0.84	1.28	47.834	-71.254										
00175-03-115-000G	0.02	0.46												
00175-03-140-000D	9.72	10.08	47.916	-71.253										
00175-03-140-000D	1.1	3.1	48	-71.237										
00175-03-140-000G	3.47	3.81	48.076	-71.263										

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00175-03-140-000G	0	3.1	48	-71.238										
00175-03-160-000D	0.02	0.78	48.087	-71.264										
00175-03-160-000D	10.51	11.26	48.026	-71.225										
00175-03-160-000G	0.02	1.23	48.087	-71.264										
00175-03-160-000G	10.6	11.67	48.175	-71.241										
00175-03-170-000D	1.97	2.45	48.185	-71.24										
00175-03-170-000G	0.02	2.42	48.185	-71.24										
00175-03-182-000D	3.48	3.94	48.229	-71.262										
00175-03-182-000G	3.6	6.51	48.174	-71.24										
00191-01-030-000C	0	1.85	47.818	-69.496	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00195-01-127-000C	13.38	15.43	48.721	-67.428										
00195-01-131-000C	0.19	1.14	48.724	-67.453										
00195-01-135-000C	0	0.39	48.726	-67.468										
00195-01-140-000C	0	0.65	48.726	-67.473										
00198-01-130-000C	11.88	13.12	48.86	-65.077										
00198-02-050-000C	0.97	1.92	48.818	-64.801										
00198-02-070-000C	1	2.43	48.833	-64.688										
00198-02-070-000C	2.43	3.7	48.836	-64.669										

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00198-02-070-000C	4.52	6.57	48.842	-64.655										
00202-02-150-000C	1.52	3.64	45.065	-73.156	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00202-02-150-000C	1.52	3.64	45.065	-73.156	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00204-01-065-000C	3.55	5.03	45.868	-70.633	Limoneuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00204-02-050-000C	0.19	1.19	46.361	-70.421	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00209-01-181-000C	6.65	7.18	45.303	-73.593	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00221-01-151-000C	1.7	2.14	45.259	-73.608	Sableux	Mixte sableux	86	8	6	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00230-01-130-000C	0	0	47.626	-69.68	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00230-01-130-000C	0	0	47.626	-69.68	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00230-01-130-000C	0	0	47.626	-69.68	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
00232-01-095-000C	9.26	11.71	47.838	-68.812	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00232-01-115-000C	0	0.5	47.89	-68.747	Argileuse-fine	Mixte argileux	3	50	47	97	LL>=40	IP<10	A-5	
00232-01-115-000C	0	0.5	47.89	-68.747	Argileuse-fine	Mixte argileux	28	42	30	72	LL>=40	IP<10	A-5	
00232-01-115-000C	0	0.5	47.89	-68.747	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00235-02-190-000C	0.9	2.93	45.674	-72.978	Limoneuse-fine	Mixte sableux	14	54	32	86	LL<40	IP<10	A-4	
00249-01-100-000C	4.39	5.31	45.581	-71.989	Loameuse-grossière	Mixte sableux	54	26	20	46	LL<40	IP<10	A-4	
00249-01-100-000C	4.39	5.31	45.581	-71.989	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00276-01-072-000C	3.46	3.83	46.335	-70.74	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	
00276-01-072-000C	3.46	3.83	46.335	-70.74	Loameuse-grossière	Mixte sableux	40	45	15	60	LL<40	IP<10	A-4	
00277-01-070-000C	1.65	2.35	46.417	-70.545	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	
00289-02-040-000C	7.1	7.67	47.652	-69.576	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00293-01-020-000C	7.72	8.35	47.885	-69.002	Argileuse-fine	Mixte argileux	3	50	47	97	LL>=40	IP<10	A-5	
00293-01-020-000C	7.72	8.35	47.885	-69.002	Argileuse-fine	Mixte argileux	28	42	30	72	LL>=40	IP<10	A-5	
00293-01-020-000C	7.72	8.35	47.885	-69.002	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00293-01-020-000C	6.45	7.31	47.877	-68.992	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00293-01-065-000C	3	3.35	48.079	-69.095	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00293-01-065-000C	1.5	2.7	48.078	-69.092	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00299-02-101-000C	6.18	7.19	49.036	-66.41										
00299-02-101-000C	1.6	3.43	48.998	-66.386										
00301-01-123-000C	0.7	1.53	45.811	-76.459	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00301-01-123-000C	0.7	1.53	45.811	-76.459	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-123-000C	0.7	1.53	45.811	-76.459	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-123-000C	0.7	1.53	45.811	-76.459	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-130-000C	0	1.8	45.819	-76.46	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-130-000C	0	1.8	45.819	-76.46	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-130-000C	0	1.8	45.819	-76.46	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00301-01-130-000C	0	1.8	45.819	-76.46	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00307-01-031-000C	0	0	45.523	-75.774	Loameuse-fine	Mixte sableux	26	58	16	74	LL<40	IP<10	A-4	
00307-01-031-000C	0	0	45.508	-75.763	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00307-01-031-000C	0	0	45.508	-75.763	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00307-01-031-000C	0	0	45.508	-75.763	Argileuse	Mixte argileux				0	LL>=40			
00307-01-031-000C	0	0	45.508	-75.763	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00309-01-041-000C	0	0	45.607	-75.387	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00309-01-041-000C	0	0	45.607	-75.387	Sableux	Mixte sableux	86	14	0	14	LL<40	IP<10	A-2-4	
00309-01-041-000C	0	0	45.607	-75.387	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00309-01-045-000C	0	0	45.608	-75.398	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00309-01-045-000C	0	0	45.608	-75.398	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00309-01-045-000C	0	0	45.608	-75.398	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00309-01-045-000C	0	0	45.608	-75.398	Loameuse-grossière	Mixte sableux	34	48	18	66	LL<40	IP<10	A-4	
00323-01-082-000C	3.93	6.68	45.948	-74.908	Sableux	Mixte sableux	79	14	7	21	LL<40	IP<10	A-2-4	
00323-01-082-000C	3.93	6.68	45.948	-74.908	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00323-01-082-000C	3.93	6.68	45.948	-74.908	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00329-01-045-000C	4.5	5.7	45.888	-74.264	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00337-01-038-000D	2.81	3.19	45.741	-73.69	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00337-01-038-000D	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00337-01-038-000D	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00337-01-038-000D	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00337-01-038-000G	2.81	3.19	45.741	-73.69	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00337-01-038-000G	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00337-01-038-000G	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00337-01-038-000G	2.81	3.19	45.741	-73.69	Argileuse	Mixte argileux	16	44	40	84	LL>=40	IP<10	A-5	
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	
00338-01-080-000C	0.93	1.58	45.329	-73.975	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00338-01-094-000C	0.04	0.7	45.34	-73.978	Limoneuse-fine	Mixte sableux	7	68	25	93	LL<40	IP<10	A-4	
00338-01-094-000C	0.04	0.7	45.34	-73.978	Argileuse-très fine	Mixte argileux	6	34	60	94	LL>=40	IP>=10	A-7	
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	
00342-01-075-000C	9.31	9.83	45.428	-74.109	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00343-02-030-000C	0	0	46.069	-73.512	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00343-02-030-000C	0	0	46.069	-73.512	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00343-02-030-000C	0	0	46.051	-73.488	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00343-02-030-000C	0	0	46.051	-73.488	Sableux	Mixte sableux	71	27	2	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	
00344-01-005-000C	0	1.8	45.657	-74.582	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
00344-01-085-000C	4.08	4.64	45.537	-74.326	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00359-01-060-000C	5.6	9.61	46.58	-72.552	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
00359-01-060-000C	5.6	9.61	46.58	-72.552	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00359-01-091-000C	0	1.2	46.592	-72.599	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
00359-01-091-000C	0	1.2	46.592	-72.599	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00359-01-091-000C	0	1.2	46.592	-72.599	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00359-01-091-000C	0	1.2	46.592	-72.599	Sableux	Mixte sableux	71	19	10	29	LL<40	IP<10	A-2-4	
00359-01-091-000C	0	1.2	46.592	-72.599	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00362-01-050-000C	8.84	9.5	47.48	-70.335	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00362-01-050-000C	8.84	9.5	47.48	-70.335	Loameuse-fine	Mixte sableux	47	35	18	53	LL<40	IP<10	A-4	
00362-01-060-000C	1.95	2.56	47.483	-70.309	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00362-01-060-000C	1.95	2.56	47.483	-70.309	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00362-01-060-000C	4.32	4.93	47.493	-70.283	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
00362-01-060-000C	4.32	4.93	47.493	-70.283	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00362-01-071-000C	0.2	0.99	47.528	-70.224	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00362-01-071-000C	0.2	0.99	47.528	-70.224	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00381-01-025-000C	7.75	8.75	47.579	-70.546	Sableux	Ne s'applique pas				0	0			
00381-01-025-000C	7.75	8.75	47.579	-70.546	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00381-01-070-000C	4.79	7.6	48.084	-70.822	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00381-01-070-000C	7.6	10.45	48.084	-70.822	Limoneuse-fine	Mixte argileux	17	53	30	83	LL>=40	IP<10	A-5	
00381-01-070-000C	4.79	7.6	48.084	-70.822	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00381-01-070-000C	7.6	10.45	48.084	-70.822	Loameuse-grossière	Mixte sableux	57	40	3	43	LL<40	IP<10	A-4	
00381-01-114-000C	4.94	6.6	48.267	-70.876	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00381-01-114-000C	4.94	6.6	48.267	-70.876	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
00410-01-100-000G	9.82	12.43	45.369	-71.922	Loameuse-fine	Mixte sableux	42	46	12	58	LL<40	IP<10	A-4	
00410-01-100-000G	9.82	12.43	45.369	-71.922	Squelettique-sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00410-01-100-000G	9.82	12.43	45.369	-71.922	Sableux	Mixte sableux				0	LL<40			
00410-01-100-000G	9.82	12.43	45.369	-71.922	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
00640-02-051-000D	3.84	3.43	45.613	-73.853	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
00730-01-025-000D	1.24	1.91	45.386	-73.608										
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Argileuse-fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Argileuse-très fine	Mixte argileux	12	37	51	88	LL>=40	IP>=10	A-7	
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Loameuse-grossière	Mixte sableux	45	34	21	55	LL<40	IP<10	A-4	
30205-01-000-000C	0	0.48	45.48	-74.286	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
47850-01-020-000C	0.32	1.13	48.355	-70.983	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
47850-02-000-000C	0	0.4	48.371	-70.966	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
61490-02-000-000C	0	0	45.309	-73.741	Argileuse-très fine	Mixte argileux	3	34	63	97	LL>=40	IP>=10	A-7	
61490-02-000-000C	0	0	45.309	-73.741	Argileuse-très fine	Mixte argileux	5	44	51	95	LL>=40	IP>=10	A-7	
64480-01-030-000D	0	0	45.524	-73.515	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
64480-01-030-000D	0	0	45.524	-73.515	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
64480-01-030-000D	0	0	45.524	-73.515	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
64480-01-030-000G	0	0	45.529	-73.52	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			
64480-01-030-000G	0	0	45.529	-73.52	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
64480-01-030-000G	0	0	45.529	-73.52	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
64480-01-030-000G	0	0	45.525	-73.516	Ne s'applique pas	Ne s'applique pas				0	0			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
64480-01-030-000G	0	0	45.525	-73.516	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
64480-01-030-000G	0	0	45.525	-73.516	Loameuse-fine	Mixte sableux	38	46	16	62	LL<40	IP<10	A-4	
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Limoneuse-fine	Mixte sableux	26	60	14	74	LL<40	IP<10	A-4	
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Argileuse-très fine	Mixte argileux				0	LL>=40			
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
73380-01-010-000C	0	0	45.634	-72.145	Loameuse-fine	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Limoneuse-fine	Mixte sableux	17	51	32	83	LL<40	IP<10	A-4	
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Limoneuse-grossière	Mixte sableux	30	64	6	70	LL<40	IP<10	A-4	
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-04-010-000C	0.65	2.79	45.443	-71.921	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Limoneuse-fine	Mixte sableux	17	51	32	83	LL<40	IP<10	A-4	
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Limoneuse-grossière	Mixte sableux	30	64	6	70	LL<40	IP<10	A-4	
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Squelettique-loameux	Mixte sableux				0	LL<40			

RTSS	Début	Fin	N (°)	W (°)	Granulométrie 1	Minéralogie	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	P#200	LL	IP	AASHTO	Extrapolés par proximité
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Loameuse	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Loameuse-grossière	Mixte sableux				0	LL<40			
75830-05-015-000C	0	0.88	45.422	-71.905	Organique	Ne s'applique pas				0	0			
94820-01-020-000C	0.62	1.63	48.497	-68.442										
96264-01-010-000C	0	0.31	48.599	-68.215	Squelettique-sableux	Mixte sableux	60	25	15	40	LL<40	IP<10	A-4	
96265-01-010-000C	0	3.08	47.905	-69.483	Squelettique-sableux	Mixte sableux	72	15	13	28	LL<40	IP<10	A-2-4	

ANNEXE E

COEFFICIENTS D'ÉTALONNAGE

E.1 Coefficients d'étalonnage pour la fissuration longitudinale de fatigue

NB. Les valeurs marquées en gras sont celles retenues par l'outil CAT à chaque itération.

N° Simulation		Initiale	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	9ème	10ème
β_{f1}	Ép. < 5 pc	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ép. > 12 pc	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032
β_{f2}		1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
β_{f3}		0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
C_1		1,31	Entre 1,2 et 1,4	Entre 1 et 1,2	Entre 0,5 et 1,5 1	Entre 1,4 et 1,6	1,31	1,31	1,31	1,31	Entre 0,5 et 1,5	Entre 0,3 et 0,4
C_2	Ép. < 5 pc	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	Entre 2 et 2,5	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0	0	0	0	0	Entre 1 et 2 optimize constant	Entre 1 et 2 optimize slope	Entre 0,5 et 2	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	Entre 0,3 et 0,4 Optimize constant
	Ép. > 12 pc	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666
Biais		-1,58	-1,1	-0,32	-0,32	-1,67	-1,55	-2,2	-1,44	-2,17	1,63	4,53
Erreur		5,73	7,83	11,11	11,11	5,31	5,8	3,7	6,29	3,72	4,89	6,97

NB. Dans l'outil CAT du logiciel AASHTOWare Pavement ME Design, les options « Optimize Constant » et « Optimize Slope » sont utilisés lors de la calibration locale des modèles de performance:

- Optimize Constant

Il s'agit du facteur d'ajustement de l'ordonnée à l'origine dans l'équation de transfert du modèle de performance.

- Optimize Slop

Il représente le facteur d'ajustement de la pente de l'équation de transfert. Ce paramètre contrôle la vitesse à laquelle la détérioration se produit dans le modèle

N° Simulation		11 ^{ème}	12 ^{ème}	13 ^{ème}	14 ^{ème}	15 ^{ème}	16 ^{ème}	17 ^{ème}	18 ^{ème}	19 ^{ème}
β_{f1}	Ép. < 5 pc	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054	Entre 0,01 et 0,025	0,02054
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0	0	Entre 0,5 et 1 Optimize constant	Entre 0,3 et 0,4 Optimize constant	0	0	0	0,5
	Ép. > 12 pc	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032
β_{f2}		1,38	1,38	Entre 1,3 et 1,4	1,38	1,38	Entre 1,2 et 1,5 1,35	1,38	1,38	1,38
β_{f3}		0,80	0,85	0,88	0,88	0,88	0,88	Entre 0,5 et 0,8	0,88	0,88
C_1		Entre 0,5 et 1,5	Entre 0,5 et 1,5	Entre 0,5 et 1,5	Entre 0,5 et 1,5	Entre 0,5 et 1,5	1,31	1,31	1,31	Entre 0,5 et 1,5 1,25
C_2	Ép. < 5 pc	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	Entre 0,05 et 0,5 Optimize constant	0	0	0	0
	Ép. > 12 pc	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666
Biais		-0,47	0,66	0,74	-1,36	-1,26	0,33	-2,27	-1,44	0,46
Erreur		3,57	4,15	4,19	3,3	3,26	13,42	3,72	6,29	13,90

N° Simulation		20 ^{ème}	21 ^{ème}	22 ^{ème}	23 ^{ème}
β_{f1}	Ép. < 5 pc	0,02054	0,02054	0,02054	0,02054
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0,5	0,5	0	0,5
	Ép. > 12 pc	0,001032	0,001032	0,001032	0,001032
β_{f2}		Entre 1,35 et 1,4 1,3875	1,31	1,35	Entre 0,1 et 1
β_{f3}		0,88	Entre 0,5 et 0,9	0,5	0,88
C_1		1,31	1,31	1,31	1,31
C_2	Ép. < 5 pc	2,1585	2,1585	2,1585	2,1585
	5pc ≤ Ép. ≤ 12pc	0	0	0	0
	Ép. > 12 pc	3,9666	3,9666	3,9666	3,9666
Biais		-0,31	-2,27	-2,27	97,72
Erreur		11,12	3,72	3,72	97,98

E.2 Coefficients d'étalonnage pour l'Orniérage

NB. Les valeurs marquées en gras sont celles retenues par l'outil CAT à chaque itération.

N° Simulation	Initial e	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	9ème	10ème	11ème	12ème
β_{r1}	0,4	Entre 0,1 et 0,5 0,1	0,15	0,20	Entre 0,01 et 0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1
β_{r2}	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	Entre 0,45 et 0,6 0,45	0,3	Entre 0,05 et 0,4	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
β_{r3}	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	Entre 1,25 et 1,4 1,25	Entre 1,1 et 1,2	1,36	1,36	1,36
β_{s1} Couche de fondation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
β_{s1} Couche de sous fondation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Entre 0,5 et 1,5	0,75	Entre 0,3 et 1,1
Biais	5,02	1,69	2,18	2,68	0,81	2,16	0,88	0,72	3,73	2,84	2,39	3,52	-1,45
Erreur	7,14	4,08	4,44	4,86	3,62	4,42	3,64	3,58	5,88	5,02	5,37	6,03	3,82

N° Simulation	Initial e	13 ^{ème}	14 ^{ème}	15 ^{ème}	16 ^{ème}	17 ^{ème}	18 ^{ème}	19 ^{ème}	20 ^{ème}	21 ^{ème}	22 ^{ème}	23 ^{ème}	24 ^{ème}
β_{r1}	0,4	0,1	0,1	0,4	0,01	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
β_{r2}	0,52	Entre 0,3 et 0,45	0,52	0,45	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
β_{r3}	1,36	1,36	Entre 1,1 et 1,25	1,36	Entre 0,5 et 1,2	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
β_{s1} Couche de fondation	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	0,5
β_{s1} Couche de sous fondation	1	1	1	Entre 0,5 et 1,5	1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,1	0,5	0,1	0,2
Biais	5,02	0,75	1,24	-0,08	0,73	-0,7	-0,25	0,43	0,65	-1,37	0,43	-0,49	-0,04
Erreur	7,14	3,6	3,82	3,65	3,59	4,61	4,57	4,62	4,66	4,73	4,62	4,66	4,63

N° Simulation	Initial e	25 ^{ème}	26 ^{ème}	27 ^{ème}	28 ^{ème}	29 ^{ème}	30 ^{ème}	31 ^{ème}	32 ^{ème}	33 ^{ème}	34 ^{ème}	35 ^{ème}
β_{r1}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
β_{r2}	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
β_{r3}	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
β_{s1} Couche de fondation	1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,25	0,25	0,3	0,32	0,35	0,3	0,35
β_{s1} Couche de sous fondation	1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,25	0,3	0,25	0,32	0,35	0,35	0,3
Biais	5,02	-0,7	-0,25	-0,48	-0,03	-0,36	-0,14	-0,26	0,1	0,3	0,19	0,08
Erreur	7,14	4,61	4,57	4,6	4,59	4,59	4,58	4,59	4,6	4,62	4,6	4,6

E.3 Coefficients d'étalonnage pour la Fissuration Transversale

NB. Les valeurs marquées en gras sont celles retenues par l'outil CAT à chaque itération.

N° Simulation		Initiale	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
Niveau 1	> 57 °F	0	Entre 1 et 50	Entre 10 et 20	Entre 5 et 10	1	1
	≤ 57 °F	0	0	0	0	0	0
Niveau 2	> 57 °F	0	0	0	0	Entre 10 et 50	0
	≤ 57 °F	0	0	0	0	0	0
Niveau 3	> 57 °F	0	0	0	0	0	0
	≤ 57 °F	0	0	0	0	0	Entre 10 et 50
Biais		-51,63	-51,63	-51,63	-51,63	-51,63	-51,25
SEE		80,15	80,15	80,15	80,15	80,15	79,73

E.4 Coefficients d'étalonnage pour l'Indice du Rugosité Internationale

NB. Les valeurs marquées en gras sont celles retenues par l'outil CAT à chaque itération.

N° Simulation	Initiale	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème	8ème	9ème	10ème	11ème	12ème
C_1	40	1	5	20	35	55	40	40	40	40	40	40	40
C_2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,05	0,2	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
C_3	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,003	0,1	0,008	0,008
C_4	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,01	0,05
Biais	0,03	-0,23	-0,21	-0,1	0	0,13	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,02	0,37
Erreur	0,41	0,46	0,45	0,41	0,40	0,43	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,56

N° Simulation	Initiale	13 ^{ème}	14 ^{ème}	15 ^{ème}	16 ^{ème}	17 ^{ème}	18 ^{ème}	19 ^{ème}
C_1	40	50	55	35	35	35	35	35
C_2	0,4	0,1	0,4	0,4	0,4	0,1	0,5	0,5
C_3	0,008	0,008	0,01	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
C_4	0,015	0,015	0,015	0,01	0,05	0,015	0,015	0,01
Biais	0,03	0,09	0,13	-0,05	0,33	-0,01	0	-0,05
Erreur	0,41	0,42	0,43	0,42	0,53	0,40	0,40	0,42

