

Effet des charges sur la chaussée en période de restriction de charges

Rapport final



Mamadou Badiane
Ahmed El youssoufy
Guy Doré
Jean-Pascal Bilodeau

Rapport GCT-2016-01
Ministère des Transports, de la Mobilité durable
et de l'Électrification des transports
Groupe de recherche en ingénierie des chaussées
www.gci.ulaval.ca

Mars 2016



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil

Résumé

Dans un contexte climatique rigoureux comme celui du Québec, l'interaction entre la charge et le climat a une très grande influence sur la performance des structures de chaussées flexibles (Doré et Zubeck, 2009). Pendant le dégel printanier, avec la fonte de la glace, la chaussée s'affaiblit et cet affaiblissement la rend vulnérable à la sollicitation par le trafic lourd ce qui accélère divers phénomènes de dégradation, notamment l'endommagement par fatigue et l'orniérage structural (Farcette, 2010). Afin de minimiser les effets des charges lourdes sur une chaussée affaiblie lors du printemps, les administrations routières choisissent souvent de limiter les charges par essieu ou par véhicule lors du dégel. L'objectif de ce projet est de développer un outil d'aide pour la gestion des restrictions de charge en période de dégel en fonction des données recueillies par les stations de météo routière. Deux sections expérimentales composées des mêmes matériaux ont été utilisées pour ce projet : une a été construite dans le laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval et la deuxième est située au Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL). Pour bien interpréter le comportement des structures, des jauges de déformations verticales et horizontales, des jauges de contraintes, des jauges de teneur en eau et des thermistances ont été installées dans chaque couche. Pour solliciter mécaniquement la chaussée, un simulateur de véhicules lourds a été utilisé au laboratoire et un déflectomètre à masse tombante (FWD) au SERUL. Les résultats obtenus dans les deux sites expérimentaux ont permis de bien comprendre les mécanismes d'affaiblissement de la chaussée durant la période de dégel. Ils ont aussi montré que l'application d'une période de restriction de charge pendant la période de dégel permettait d'avoir un gain sur la durée de vie de la chaussée, cette période de restriction est donc justifiée et efficace. Néanmoins, pour une meilleure gestion du réseau routier, de nouveaux critères pour mieux déterminer la période de restriction de charges ont été proposés.

Table des matières

Résumé.....	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
Remerciements.....	x
Chapitre 1 : Introduction.....	1
Chapitre 2 : Rappel de l'instrumentation et de la méthodologie utilisées	5
2.1 Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL)	5
2.2 Fosse d'essai au laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval.....	8
Chapitre 3 : Comparaison entre les résultats obtenus au SERUL et ceux obtenus dans la fosse d'essai	11
3.1 Introduction.....	11
3.2 Comportement thermique	14
a. Rappel des paramètres thermiques	14
b. Présentation des résultats	15
3.3 Comportement hydrique	23
3.4 Comportement mécanique	25
3.5 Conclusion	30
Chapitre 4 : Modèle de prédiction des modules réversibles en fonction de la variation de la teneur en eau	31
4.1 Introduction.....	31
4.2 Modèle MEPDG	31
4.3 Présentation des résultats	35
4.4 Conclusion	39
Chapitre 5 : Endommagement par fatigue	41
5.1 Introduction.....	41
5.2 Calcul de l'endommagement par fatigue	41
5.2.1 Détermination du paramètre K_{F1}	42
5.2.2 Détermination du module dynamique $ E^* $	43

5.2.3	Détermination des déformations à la base du revêtement de l'enrobé bitumineux ϵ	44
5.2.4	Loi de Miner	47
5.3	Analyse de l'endommagement total et des dommages saisonniers	48
5.3.1	Résultats obtenus au SERUL	49
a.	Endommagement pour la section 200 mm au SERUL	51
b.	Endommagement pour la section 100 mm au SERUL	56
5.3.2	Résultats obtenus dans la fosse d'essai.....	60
5.4	Conclusion	66
Chapitre 6 : Discussion		67
6.1	Discussion sur les essais au SERUL	67
6.2	Discussion sur les essais dans la fosse.....	68
Chapitre 7 : Synthèse des conclusions et recommandations.....		70
RÉFÉRENCES		73
ANNEXES		78
Annexe A : Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe au SERUL.....		79
Annexe B: Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe dans la fosse d'essai du laboratoire de géotechnique de l'Université Laval.....		85
Annexe C: Modèle de prédiction du MEPDG		90

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Profondeur des 18 thermistances dans les sections 100 mm et 200 mm au SERUL	7
Tableau 2-2 : Conditions imposées à la chaussée pendant le gel et dégel.	10
Tableau 2-3: Profondeur des 13 thermistances dans la fosse d’essai.	10
Tableau 3-1 : Comparaison des données thermiques et environnementales entre le cycle I et III	19
Tableau 3-2 : Déformations normalisées pour les cycles I et II dans la fosse d’essai et pour la section 100 mm au SERUL en 2015 pour un ID ₅₀ de 7 °C.jours.....	28
Tableau 3-3 : Déformations normalisées des différentes couches de la chaussée au SERUL à la fin de la restriction des charges (30 mai 2014 et 26 mai 2015)	29
Tableau 4-1 : Valeurs des paramètres a, b et k _s pour les matériaux grossiers et fins	32
Tableau 4-2 : Teneur en eau optimale et masse volumique sèche maximale pour la sous-fondation et le sol d’infrastructure	34
Tableau 4-3 : Recalibration des paramètres a et k _s	36
Tableau 4-4 : Erreurs RMSE et teneur en eau proche de l’optimum pour les sections 100 mm et 200 mm en 2014 et 2015 pour la couche de sous-fondation et de sol d’infrastructure.	38
Tableau 5-1 : Détermination du paramètre K _{F1} au SERUL et dans la fosse d’essai	42
Tableau 5-2 : Paramètres utilisés pour la simulation avec Winjulea au SERUL	45
Tableau 5-3 : Durée de chaque saison	49
Tableau 5-4 : Dates de début et de fin de la période de restriction de charges au SERUL ..	50
Tableau 5-5 : Endommagement total pour la section 200 mm au SERUL selon les critères du MTMDET.....	54
Tableau 5-6 : Pourcentage de dommages en fatigue associé à chaque saison au SERUL dans la section 200 mm selon les critères du MTMDET.....	55
Tableau 5-7 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères du MTMDET.....	58
Tableau 4-8 : Pourcentage des dommages associés à chaque saison dans la section 100 mm au SERUL selon les critères du MTMDET.....	59
Tableau 5-9 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères proposés selon les résultats de cette étude	60
Tableau 5-10: Endommagement total avec les critères des MTMDET et ceux proposés. ...	66

Liste des figures

Figure 2-1 : Instrumentation de la section 200 mm au SERUL.....	5
Figure 2-2 : Instrumentation de la section 100 mm au SERUL.....	6
Figure 2-3 : Stratigraphie et l'instrumentation installée dans la fosse d'essai.....	9
Figure 2-4 : Simulateur de charges lourdes de l'Université Laval	9
Figure 3-1 : Évolution de la profondeur de dégel dans la section 100 mm au SERUL en 2015	15
Figure 3-2 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface enrobé bitumineux et fondation (à 100 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.....	16
Figure 3-3 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface fondation et sous-fondation (à 300mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.....	16
Figure 3-4 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface sous-fondation et sol d'infrastructure (à 750 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.	17
Figure 3-5 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à 900 mm de profondeur dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.	17
Figure 3-6 : Relation entre la profondeur de dégel et l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) dans la section 100 mm au SERUL	20
Figure 3-7 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle I de la fosse d'essai	21
Figure 3-8 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle II de la fosse d'essai	22
Figure 3-9 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle III de la fosse d'essai	22
Figure 3-10 : Courbe de calibration des jauges ThetaProbe.....	24
Figure 3-11 : Évolution de la profondeur de dégel et des déformations normalisées dans les couches de chaussées en fonction de ID50 pendant le cycle I de la fosse d'essai	27
Figure 4-1 : Résultats de l'essai Proctor sur la sous-fondation (MG-112)	33
Figure 4-2 : Résultats de l'essai Proctor sur le sol d'infrastructure (SM)	33
Figure 4-3 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation en fonction du degré de saturation.	35
Figure 4-4 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure en fonction du degré de saturation	36
Figure 4-5 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation.	37
Figure 4-6 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation.....	37

Figure 5-1 : Exemple calcul de la déformation en traction avec Winjulea le 24 avril 2014 pour la section 200 mm au SERUL	46
Figure 5-2 : Variation des températures de l'air à la Foret Montmorency en 2014	49
Figure 5-3 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea).....	52
Figure 5-4 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea).....	52
Figure 5-5 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformations)	53
Figure 5-6 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea).....	56
Figure 5-7 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea).....	57
Figure 5-8 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformation).....	57
Figure 5-9: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle I.	63
Figure 5-10: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle II.	64
Figure 5-11: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle III.....	65

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMET) pour son soutien technique et financier. Les auteurs remercient plus particulièrement Fritz Prophète, Sébastien Piette et André Cantin pour leur disponibilité tout au long du projet.

Un gros merci à Sylvain Auger pour son aide dans l'installation des équipements et la configuration des systèmes d'acquisition et de collecte des données.

Chapitre 1 : Introduction

Au Québec, les conditions climatiques (température, gel/dégel, humidité) ont une grande influence sur le comportement des chaussées. En effet, pendant le gel des sols d'infrastructure, lorsque ceux-ci présentent une sensibilité au gel élevée, une formation de lentilles de glace se produit. La présence de ces lentilles de glace est à l'origine du soulèvement au gel. Pendant le dégel printanier, la fonte de la glace peut provoquer la saturation en eau et le sol peut alors dépasser sa limite de liquidité et perdre toute consistance, réduisant ainsi la résistance effective de la structure de chaussée à supporter le poids de la circulation automobile. Des études menées par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) sur la capacité portante des routes ont démontré qu'au printemps, la réponse d'une chaussée sous une charge est de 50 % à 70 % supérieure à celle mesurée l'été (MTMDET, dossier dégel, 2015). Cette influence prend de l'importance avec le phénomène des changements climatiques dont les effets se manifestent de plus en plus.

Pour minimiser les effets des charges lourdes sur une chaussée affaiblie lors du printemps, les administrations routières choisissent souvent de limiter les charges par essieu ou par véhicule lors du dégel. Actuellement, au Québec, l'imposition des restrictions actuelles réduit l'agressivité d'un camion de 22 % en moyenne, mais augmente de 7 % le nombre de déplacements requis pour transporter la même quantité de marchandise (St-Laurent, 2003). Durant la période hiver-printemps, le MTMDET réalise le suivi de la progression des fronts de gel et de dégel dans les chaussées avec des lectures effectuées manuellement dans des tubes de gel. Le déploiement de stations météo routières, entrepris récemment sur le réseau routier, en remplacement des tubes de gel, permet le suivi automatisé de la progression du gel/dégel dans les chaussées à l'aide des données de température qui y sont prélevées de façon continue. La période de restriction des charges déterminée avec les données provenant de la lecture des tubes de gel doit désormais se faire en fonction des données de température.

Les activités de recherches du projet « Effet des charges sur les chaussées en période de restriction des charges » ont pour but d'adapter et valider la méthode mise au point par le MTMDET pour déterminer la période de restriction des charges. Dans un deuxième temps, elles ont aussi pour but de fournir un outil d'aide aux autorités du MTMDET afin de gérer le réseau routier en période de dégel. Cet outil permettra d'évaluer les risques de dommages causés par les véhicules lourds et leurs impacts sur les chaussées. L'évaluation de ces impacts pourra permettre d'appuyer les décisions des gestionnaires relativement à la période d'imposition des restrictions de charge. Il est à noter que le décret sur les restrictions de charge a une portée très vaste sur les infrastructures routières et influence de façon importante l'économie du Québec. Il englobe l'ensemble du réseau routier (sous juridiction du MTMDET et municipal) et touche directement l'industrie du transport ainsi que les autres secteurs de l'économie qui en dépendent.

Ainsi, les objectifs généraux du projet se résument comme suit :

1. Améliorer les connaissances sur les mécanismes d'affaiblissement des chaussées au dégel.
2. Développer des outils de prédiction fiables sur l'évolution de la perte et de la récupération de la capacité structurale de la chaussée en fonction de l'évolution des températures et du dégel dans la chaussée.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont les suivants :

- Développer un outil d'aide pour la gestion des restrictions de charge en période de dégel en fonction des données recueillies par les stations de météo routière.

- Intégrer cet outil au logiciel d'exploitation des données des stations météo routières pour le suivi du gel/dégel.

Ce rapport final établit un lien, des comparaisons et des validations entre les phases expérimentales qui ont eu lieu au Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL) et dans la fosse d'essai du laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval. Les conclusions et les recommandations du projet y sont aussi présentées.

Chapitre 2 : Rappel de l'instrumentation et de la méthodologie utilisées

2.1 Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL)

Le Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL) est situé à la forêt Montmorency au kilomètre 103 sur la route 173. Ce site est constitué de six planches expérimentales. Dans le cadre de ce projet, deux planches expérimentales ont été utilisées : celles avec des épaisseurs d'enrobé bitumineux de 200 mm et 100 mm, respectivement. Les autres couches sous-jacentes des deux sections d'essais sont identiques.

L'instrumentation installée dans les sections 200 mm et 100 mm est présentée respectivement aux Figure 2-1 et Figure 2-2. Dans la section 200 mm, des jauges de déformation verticales et des jauges de teneur en eau ont été installées dans les couches de matériaux granulaires et de sol d'infrastructure ainsi qu'une jauge de succion matricielle dans la couche de fondation. Dans la section 100 mm, la même instrumentation a été utilisée et en plus de cela, des jauges de contraintes ont été installées. Aussi, dans les deux sections, des jauges de déformations transversales et longitudinales ont été installées dans l'enrobé bitumineux.

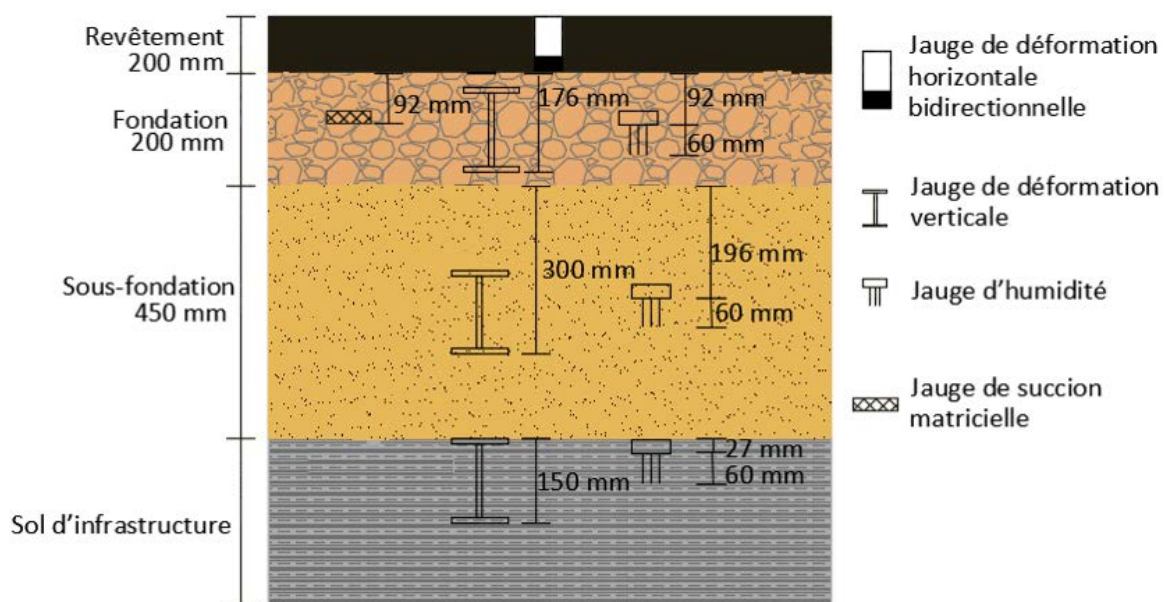


Figure 2-1 : Instrumentation de la section 200 mm au SERUL

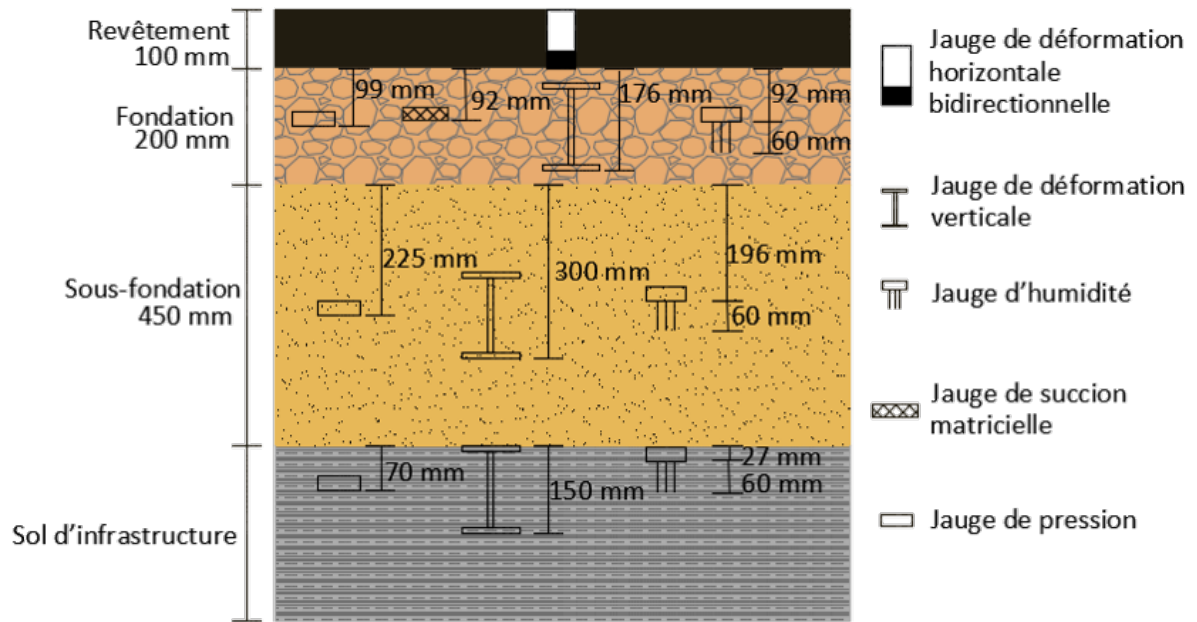


Figure 2-2 : Instrumentation de la section 100 mm au SERUL

En complément et pour évaluer le comportement thermique de la chaussée, des câbles de 18 thermistances ont été installés dans chacune des sections expérimentales (100 mm et 200 mm). Le Tableau 2-1 présente les profondeurs des thermistances dans les deux sections au SERUL.

**Tableau 2-1 : Profondeur des 18 thermistances dans les sections 100 mm et 200 mm au
SERUL**

Numéro Thermistances	Profondeur des thermistances (mm)
Th1	50
Th2	100
Th3	200
Th4	300
Th5	400
Th6	600
Th7	900
Th8	1100
Th9	1300
Th10	1500
Th11	1700
Th12	1900
Th13	2000
Th14	2200
Th15	2400
Th16	2600
Th17	2800
Th18	3000

La simulation du passage d'un véhicule lourd a été faite à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante (FWD). Les essais ont été effectués à raison d'une fois par semaine pendant le printemps et une fois par mois pendant l'été.

Le suivi du comportement thermique, hydrique et mécanique des deux structures de chaussées (sections 100 et 200 mm) a été fait. Les résultats des deux années d'expérimentations sont disponibles dans les rapports d'étape GCT 04-2014 (Badiane et coll., 2014) et GCT 02-2015. (Badiane et coll., 2015)

2.2 Fosse d'essai au laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval

La section d'essai 100 mm du SERUL a été reconstituée, selon la stratigraphie présentée à la Figure 2-3, dans la fosse d'essai au laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval. . Les dimensions de la fosse sont de 2 x 6 x 2 m³. La structure de la chaussée est constituée de 100 mm d'enrobé bitumineux, de 200 mm de MG-20 en fondation, de 450 mm de MG-112 en sous-fondation et de 1250 mm de sable silteux (SM). Le sol d'infrastructure utilisé a été échantillonné au SERUL et transporté jusqu'au laboratoire de l'Université Laval. La section de la chaussée a été instrumentée avec des capteurs permettant de mesurer les déformations verticales dans la couche de la fondation, de la sous-fondation et de celle du sol d'infrastructure, ainsi que des capteurs de déformations transversale et longitudinale à la base du revêtement. De plus, des thermistances ont été placées pour la mesure des températures à différentes profondeurs présentées dans le Tableau 2-3. L'instrumentation est montrée sur la Figure 2-3. Un simulateur mobile de charge lourde présenté à la Figure 2-4 a été utilisé sur la section de chaussée. Les trois essais de chargements ont été réalisés en soumettant la chaussée aux conditions présentées dans le Tableau 2-2.

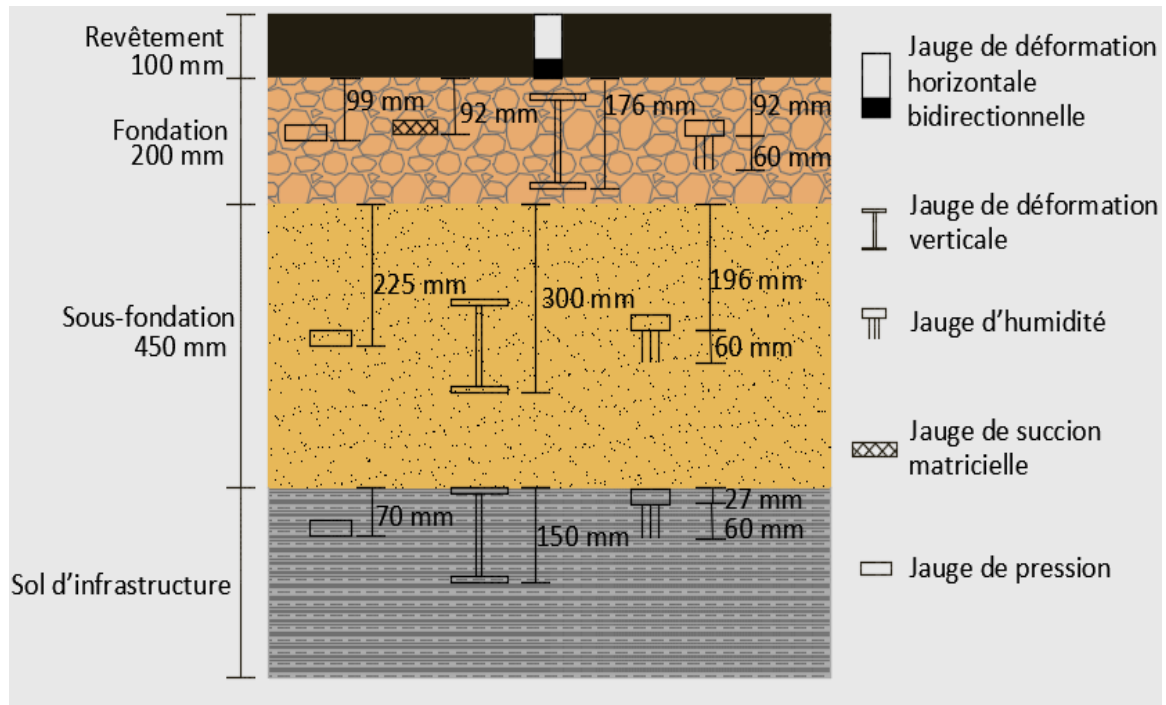


Figure 2-3 : Stratigraphie et l'instrumentation installée dans la fosse d'essai



Figure 2-4 : Simulateur de charges lourdes de l'Université Laval

Tableau 2-2 : Conditions imposées à la chaussée pendant le gel et dégel.

Cycle	Position de la nappe(m)	Température (°C) de gel/dégel et remarques	Profondeur de gel/dégel (m)	Charge appliquées
1^{er} gel	1.6	-10	1.5	5000 et 5500 kg
1^{er} dégel	1.6	10	-	5000 et 4000 kg
2^{ème} gel	1.6	-10	1.5	5000 et 5500 kg
2^{ème} dégel	1.6	20. Application d'une température de -10 lorsque la profondeur de dégel atteint 30, 60, 90, 120 cm.	Pour les conditions de profondeur de dégel exposée, passage de roue pour des températures de 20, 10, 0 et -5 à <u>mi-couche de l'enrobé.</u>	
3^{ème} gel	0.8	-10	1.5	5000 et 5500 kg
3^{ème} dégel	0.8	10	-	5000 et 4000 kg

Tableau 2-3: Profondeur des 13 thermistances dans la fosse d'essai.

Numéro Thermistances	Profondeur des thermistances (mm)
1	50
2	100
3	200
4	300
5	400
6	600
7	900
8	1100
9	1300
10	1500
11	1700
12	1900
13	2000

Chapitre 3 : Comparaison entre les résultats obtenus au SERUL et ceux obtenus dans la fosse d'essai

3.1 Introduction

Les essais qui ont été effectués durant ce projet, soit les 2 années d'expérimentation au SERUL et les 3 cycles d'essai dans la fosse d'essai, ont permis de tirer les observations citées ci-dessous.

Au SERUL, les observations suivantes ressortent (Badiane et coll., 2015):

- Dans la section avec un enrobé bitumineux d'une épaisseur de 200 mm, le comportement mécanique de la chaussée varie fortement avec l'évolution de la température dans l'enrobé bitumineux. En effet, la température influence beaucoup la rigidité de l'enrobé bitumineux (Doucet, 2014) et plus l'enrobé est épais, plus l'influence de la température sur toutes les couches de la chaussée est importante. Les déformations maximales ont donc été notées pendant l'été lorsque la température est plus élevée.
- Aussi, il existe de bonnes corrélations entre les déformations des différentes couches de la structure de chaussée et les paramètres de déflexion suivants : l'indice de courbure à la surface (SCI), l'indice de dommage à la base (BDI) et l'indice de courbure à la base (BCI).

Les relations entre la déflexion maximale D_0 et la déformation verticale de la couche de fondation, entre l'indice SCI et le module dynamique de l'enrobé bitumineux et entre l'indice BCI et la déformation dans la couche de fondation ont donné de bons coefficients de détermination R^2 (0,94 ; 0,82 et 0,74 respectivement). Par contre, la corrélation n'est pas bonne entre l'indice BCI et la déformation verticale dans la sous-fondation. En effet, bien des facteurs peuvent influencer le comportement de la

couche épaisse de sous-fondation. Entre autres, la mesure d'une jauge de longueur restreinte peut difficilement représenter le comportement d'une couche sur toute son épaisseur en conditions de dégel.

- Dans la section avec un enrobé d'une épaisseur de 100 mm, la hausse de la teneur en eau pendant le dégel et de la température de l'enrobé bitumineux influencent beaucoup la variation du comportement mécanique de la chaussée avec des hausses notées pour les déformations.

Un indice de dégel en surface de 16 °C.jours a été nécessaire pour dégeler Complètement la couche de fondation. Cette valeur est en accord avec les valeurs d'indice de dégel utilisées pour la gestion des restrictions de charge selon la littérature (C-SHRP, 2000 ; Bradley et coll., 2012).

L'indice de courbure de surface (SCI) est relié à la rigidité dans les premiers 200 mm environ. Ainsi, lorsque le revêtement est mince (≤ 100 mm), l'indice SCI est relié au revêtement jumelé à la couche de fondation supérieure. C'est la même chose pour les indices BDI (200 à 400 mm) et BCI (400 à 800 mm) qui sont reliés respectivement à la couche de fondation jumelée à la couche de sous-fondation et à la couche de sous-fondation jumelée à la couche de sol d'infrastructure. Des relations entre ces indices et les déformations des différentes couches n'ont donc pas pu être calculées. À la place, en se basant sur l'hypothèse que la zone de contrainte est située à un angle de 34° sous la surface (Bendana et al, 1994 cité par Imbs 2003), de nouveaux paramètres de déflexions ont été développés dans la section 100 mm: SCI*, BDI* et BCI*. Cependant, ils ne donnaient pas de bonnes corrélations avec les déformations mesurées par les jauges dans les différentes couches de la structure de chaussée avec des coefficients de détermination R^2 assez faibles. Afin de calculer les indices de courbures (SCI* et BCI*), l'allure du bassin de déflexion a été assumée comme étant une droite linéaire. Cette hypothèse peut expliquer la mauvaise corrélation observée étant donné que la représentation réelle d'un bassin de déflexion (Scullion, 1988) est différente.

À la fosse d'essai, les résultats des trois cycles de gel-dégel ont permis de tirer les observations suivantes :

- Pour le cycle I, durant le gel, les contraintes et les déformations diminuent progressivement avec l'avancé du front de gel dans la chaussée. À l'inverse, durant le dégel, les contraintes et les déformations augmentent avec la progression du front de dégel et la hausse des températures au début du dégel. Aussi, durant le gel, les déflexions mesurées à la surface d'une chaussée flexible sont corrélées avec la progression du gel dans l'enrobé bitumineux. Après un premier cycle de gel-dégel, la diminution des modules de rigidité dans les différentes couches de la structure de chaussée indique un endommagement de ces dernières.
- Pour le cycle II, durant le gel, la diminution des contraintes et déformations débute lorsque le front de gel commence à pénétrer dans le revêtement. Ensuite, les contraintes et les déformations se stabilisent lorsque le front de gel dépasse la fondation. Durant le gel-dégel, les résultats ont montré que les contraintes et les déformations de la fondation et de la sous-fondation varient avec la température à 50 mm dans le revêtement. De plus, lorsque le front de dégel dépasse le revêtement, il continue sa progression dans la chaussée même dans des conditions d'alternance de cycles de gel-dégel. Finalement, les déformations et les contraintes dans le sol d'infrastructure sont presque nulles avant que le front de dégel atteigne le sol, mais lorsque le front de dégel y pénètre, les déformations et les contraintes augmentent rapidement.
- Pour le cycle III, durant le gel, les résultats ont aussi montré que les déformations et les contraintes diminuent lorsque le front de gel commence à pénétrer dans le revêtement et se stabilisent lorsque le corps de la chaussée est complètement gelé. Durant le dégel, le comportement mécanique de la chaussée est différent du comportement mécanique observé durant le cycle I. En effet, cette fois-ci, la période de récupération de la capacité structurale de la chaussée n'a pas été complète. Aussi,

à la fin du dégel, les déformations et les contraintes convergent lentement vers des valeurs constantes. Concernant le soulèvement, la faible profondeur par rapport à la surface de la nappe phréatique a entraîné un soulèvement au gel maximal de 48 mm. Aussi, après trois cycles de gel-dégel, les modules de rigidité résiduels des différentes couches non liées continuent à diminuer. Cela montre que la chaussée a potentiellement subi des dommages significatifs lors de la réalisation des essais.

Une comparaison plus approfondie sera présentée dans les paragraphes suivants en se basant sur le comportement thermique, hydrique et mécanique de la chaussée.

3.2 Comportement thermique

a. Rappel des paramètres thermiques

Afin d'analyser le comportement thermique de la chaussée, il est important de faire un rappel sur les paramètres thermiques utilisés dans le rapport d'étape 2 (Badiane et coll., 2015) :

➤ **ID_R : Indice de dégel réel des températures en surface**

L'indice de dégel des températures de l'air en surface est obtenu en additionnant les valeurs de températures positives ($> 0^{\circ}\text{C}$). Ensuite, un facteur de correction n égal à 2 a été appliqué pour déterminer les températures réelles de surface au SERUL ce qui permet de prendre en compte empiriquement la radiation solaire (Doré et Zubeck, 2008). Dans la fosse d'essai, étant donné qu'il n'y a pas de radiation solaire, aucun facteur de correction n'a été appliqué.

➤ **ID₅₀ : Indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur**

Afin de mieux comparer les résultats du SERUL et ceux obtenus à la fosse d'essai, l'indice de dégel a été calculé en additionnant les valeurs de températures positives ($> 0^{\circ}\text{C}$) à 50 mm de profondeur. Cette mesure a été choisie pour éviter de convertir la température de l'air en

température de surface, étant donné l'absence de radiation solaire dans la fosse. Dans ce cas, la température de l'air est égale à la température de surface, ce qui n'est pas le cas au SERUL. Le calcul de l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur n'a pas été effectué dans la section 200 mm, car il n'y a pas de station météo routière à cet endroit, et par conséquent, les données de températures n'étaient donc pas disponibles en continu.

b. Présentation des résultats

La détermination de la profondeur de gel et de dégel a été faite en identifiant la profondeur à laquelle le gradient de température croise l'isotherme 0 °C et est présentée sur la Figure 3-1. Les Figure 3-2 à 3-5 montrent les ID_R et ID_{50} ainsi que le temps de dégel requis pour le dégel de chaque couche dans la section 100 mm au SERUL en 2015 et dans la fosse d'essai durant les trois cycles. Les résultats du SERUL en 2014 n'ont pas été présentés, car la station météo ne fonctionnait pas au début du dégel.

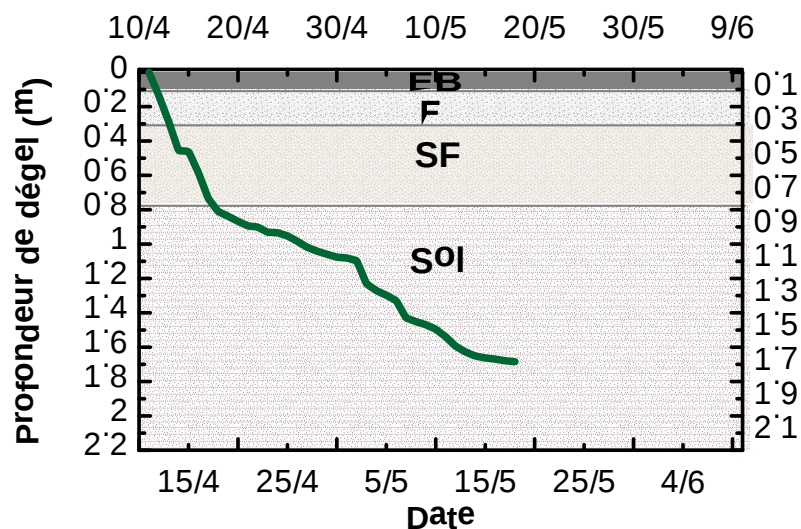


Figure 3-1 : Évolution de la profondeur de dégel dans la section 100 mm au SERUL en 2015

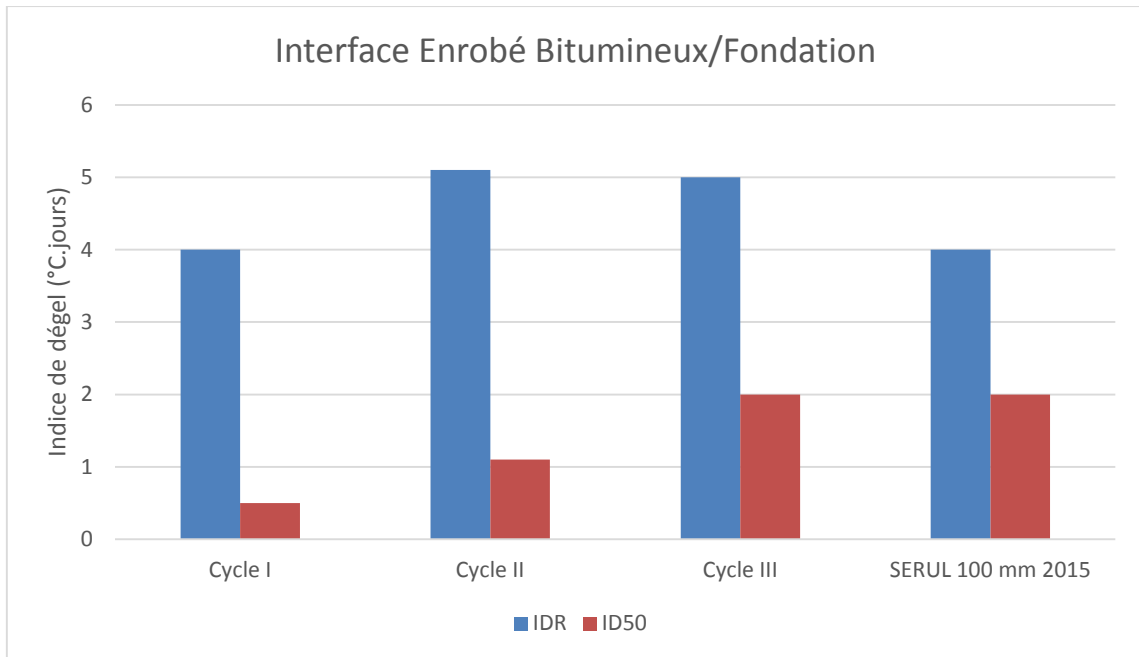


Figure 3-2 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface enrobé bitumineux et fondation (à 100 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

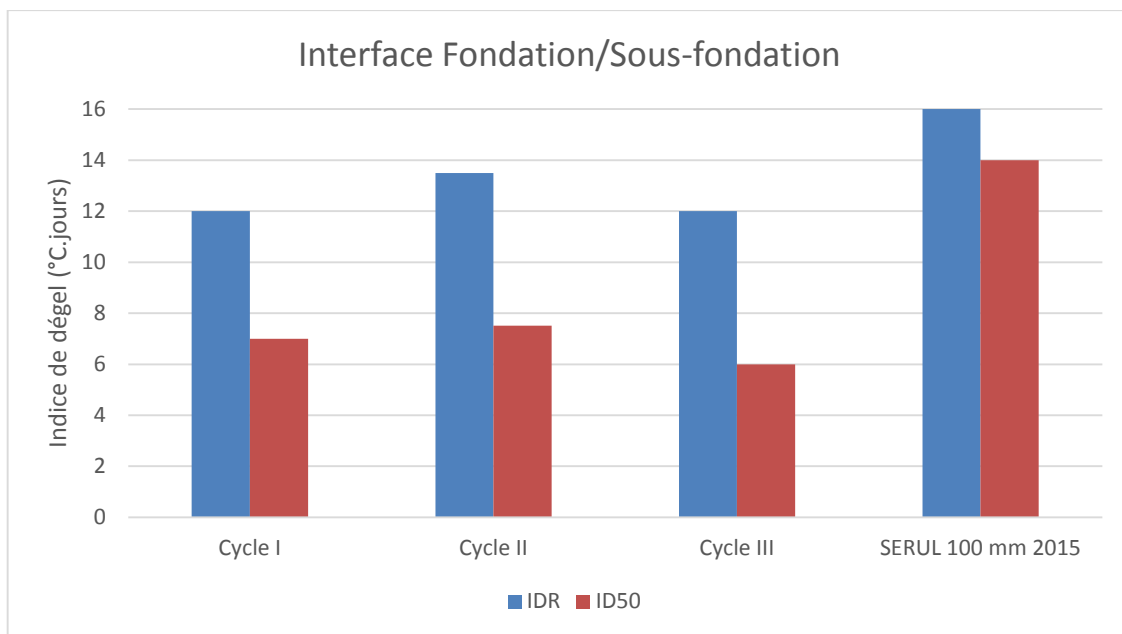


Figure 3-3 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface fondation et sous-fondation (à 300mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

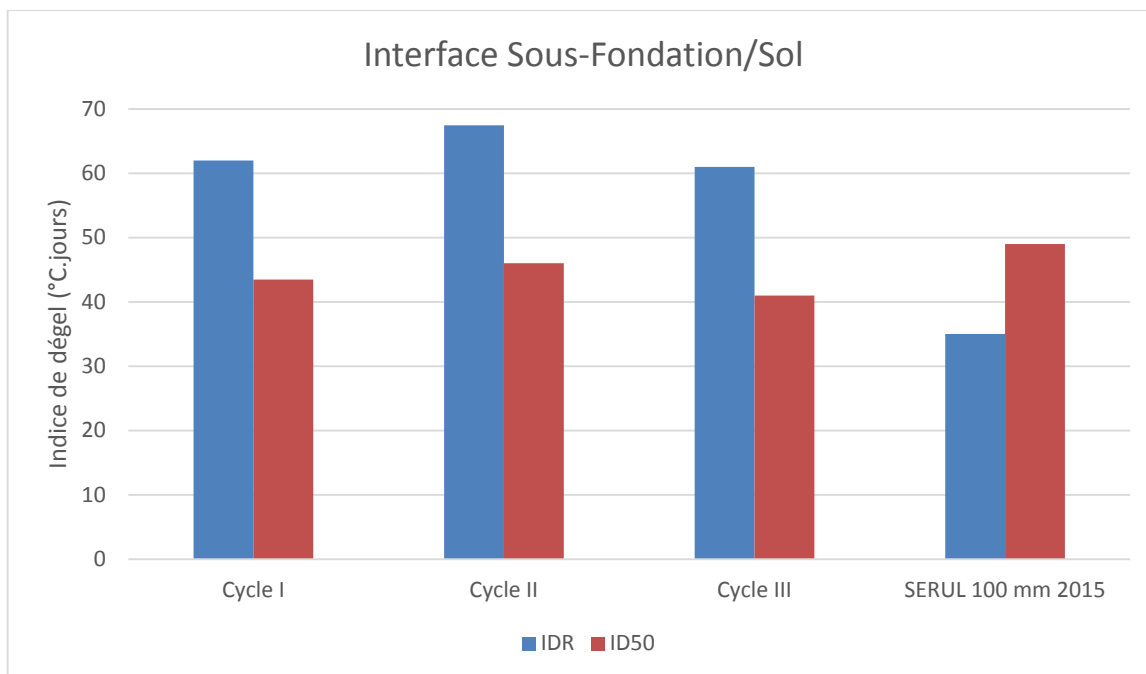


Figure 3-4 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface sous-fondation et sol d'infrastructure (à 750 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

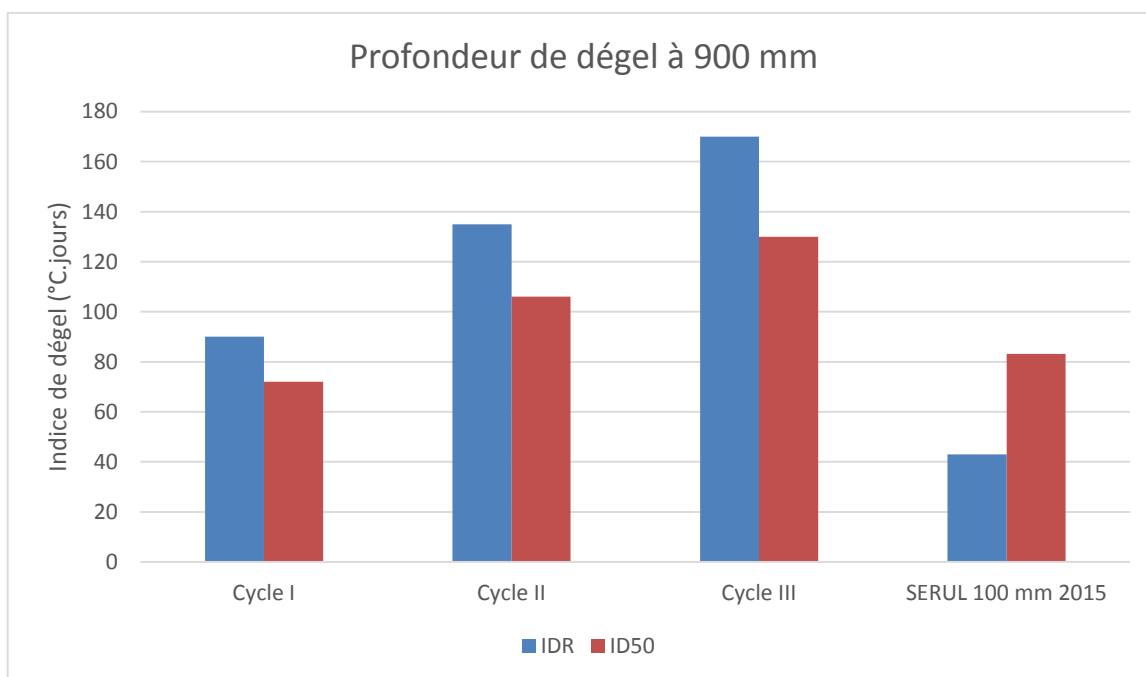


Figure 3-5 : ID_R et ID_{50} nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à 900 mm de profondeur dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

D'après la Figure 3-2, il est possible de constater que l'indice de dégel réel (ID_R) et l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) requis pour dégeler la couche d'enrobé bitumineux de 100 mm est assez semblable dans la fosse d'essai et au SERUL (entre 4 et 5,1 °C.jours pour ID_R et entre 0,5 et 2 °C.jours pour ID_{50}).

D'après la Figure 3-3, la couche de fondation a été dégelée avec des indices de dégel assez semblables pour les 3 cycles dans la fosse d'essai (entre 12 et 13,5 °C.jours pour ID_R) et à 16 °C.jours au SERUL.

Des études antérieures réalisées en Alaska, Minnesota et Washington [Stubstad et Connor (1982) et Lary et coll. (1984), cités par Girard, 1996] ont montré que les chaussées gélives subissent une perte de capacité portante en comparaison avec l'été lorsque le dégel atteint le bas de la fondation. Il s'agit donc d'une période critique pour la mesure de la réponse structurale afin de connaître réellement la performance d'une chaussée souple lors du dégel. Selon la littérature (C-SRHP, 2000; Bradley et coll., 2012), pour des sections expérimentales ayant des épaisseurs d'enrobé bitumineux compris entre 75 et 150 mm, des indices de dégel des températures en surface compris entre 13 et 15 °C.jours sont nécessaires pour le dégel des matériaux granulaires. Les indices de dégel trouvés sont donc en accord avec la littérature.

Lorsque la profondeur de dégel atteint le sol d'infrastructure, il y a une différence entre les indices de dégel en surface dans la fosse d'essai et ceux au SERUL comme l'illustre la Figure 3-4. En effet, une semaine avec des températures froides la nuit au SERUL a ralenti la progression de l'indice de dégel, mais les températures à 50 mm de profondeur n'ont pas beaucoup varié à cette période. Sur cette figure, on peut aussi remarquer que l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur est assez semblable pour le SERUL et dans la fosse d'essai.

La différence entre le cycle I et le cycle III dans la fosse se situe au niveau de la nappe phréatique (1600 mm de profondeur et 800 mm de profondeur respectivement). Ainsi, la combinaison des températures négatives, du sol gélif et d'une plus grande quantité d'eau a

provoqué un soulèvement plus important pour le cycle III. Il a donc fallu un indice de dégel plus élevé (presque le double) pour dégeler la chaussée jusqu'à 900 mm de profondeur pendant le cycle III comme montré sur la Figure 3-5.

Le Tableau 3-1 résume les différents paramètres influençant la stabilité thermique de la fosse : la position de la nappe phréatique, l'indice de dégel critique, la profondeur de dégel critique et le soulèvement au gel durant le cycle I et III.

Tableau 3-1 : Comparaison des données thermiques et environnementales entre le cycle I et III

	Position de la nappe phréatique (m)	Indice de dégel en surface (°C.j)	Profondeur de dégel critique (m)	Soulèvement au gel (mm)
Cycle I	1,6	90	0,9	13
Cycle III	0,8	170	0,9	28

D'après le Tableau 3-1, il est possible de constater que la profondeur de dégel critique (profondeur où les déformations dans les différentes couches atteignent leur maximum) est identique pour les cycles I et III. Cependant, les valeurs de l'indice de dégel en surface et du soulèvement au gel durant le cycle III ont été presque doublées comparativement à celles du cycle I. La profondeur à laquelle est située la nappe phréatique au cycle III est plus faible que celle du cycle II. Cette particularité entraîne une augmentation de l'indice de dégel pour atteindre une profondeur donnée et du soulèvement au gel durant le cycle III.

Lors du dégel du cycle II, des températures négatives en surface ont été imposées lorsque la profondeur de dégel avait atteint 30, 60, 90 et 120 cm de profondeur. Il est donc normal que l'indice de dégel du cycle II soit plus élevé que celui du cycle I puisque le dégel de la chaussée est plus long.

Les indices de dégel calculés à 50 mm de profondeur au SERUL sont assez semblables à ceux trouvés pour le cycle I de la fosse d'essai. Cet indice (ID_{50}) peut donc être un bon outil pour la gestion des restrictions de charges. Ainsi, une relation entre la profondeur de dégel et

l'indice de dégel des températures à 50 mm a été étudiée. Les résultats des essais au SERUL dans la section 100 mm en 2015 ont été utilisés pour développer cette relation et sont présentés sur la Figure 3-6.

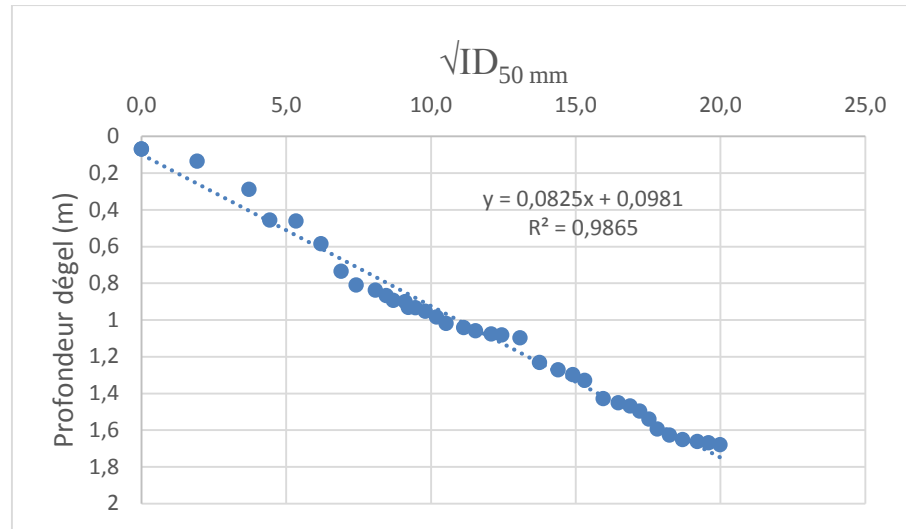


Figure 3-6 : Relation entre la profondeur de dégel et l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) dans la section 100 mm au SERUL

Sur la Figure 3-6, une très bonne corrélation ressort entre les indices de dégel à 50 mm de profondeur (ID_{50}) et la profondeur de dégel. En effet, le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,99.

À partir de la régression linéaire effectuée sur la Figure 3-6, l'équation 3-1 présente la relation entre la profondeur de dégel et l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur :

$$X_{dégel} = 0,0825 * \sqrt{ID_{50}} + 0,098 \quad [\text{Équation 3-1}]$$

Avec

$X_{dégel}$ = profondeur de dégel (m)

ID_{50} = Indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{jours}$)

L'équation 3-1 a permis de prédire la profondeur de dégel dans la fosse d'essai du laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval pour les cycles I, II et III. Les Figure 3-7 à Figure 3-9 présentent la relation entre les profondeurs de dégel réelles et celles prédites pour les cycles I à III. L'erreur RMSE (Root Mean Square Error) indiquée sur chaque figure a été calculée avec l'équation 3-2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [\text{Équation 3-2}]$$

Avec

y_i : Profondeur de dégel réelle (m)

$\hat{y}_i$: Profondeur de dégel prédite (m)

n : Nombre total de données

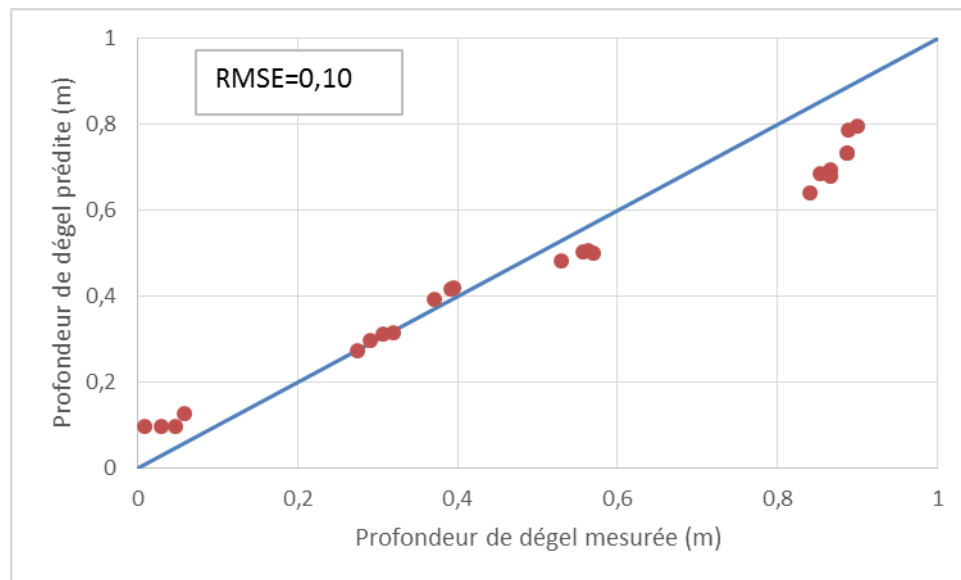


Figure 3-7 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle I de la fosse d'essai

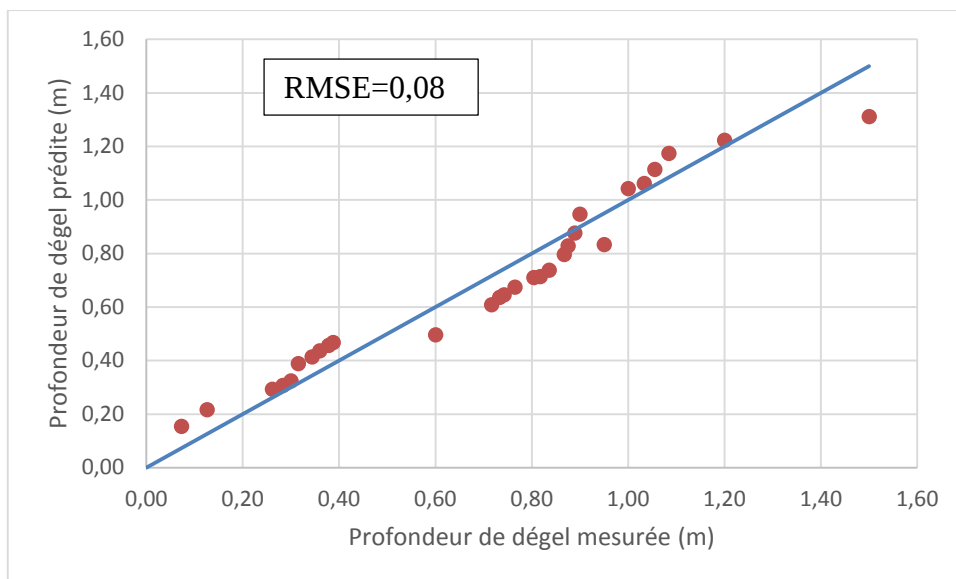


Figure 3-8 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle II de la fosse d'essai

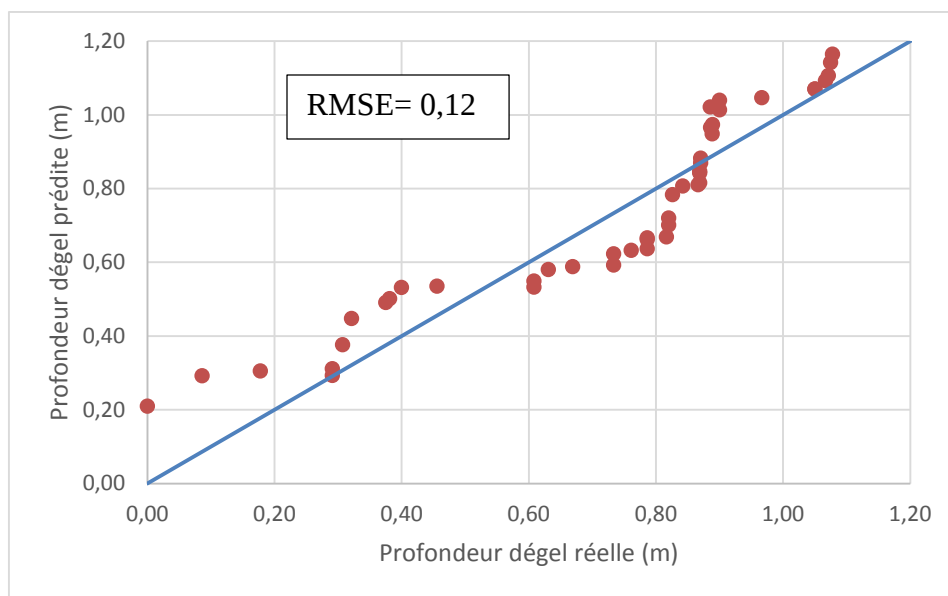


Figure 3-9 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle III de la fosse d'essai

Les erreurs RMSE sont donc de 0,10 ; 0,08 et 0,12 pour les cycles I, II et III respectivement. Les meilleurs résultats sont obtenus au cycle II. Cette observation était attendue, car pendant

ce cycle, des alternances de cycle de gel-dégel ont été faites. Le cycle II se rapproche beaucoup plus des conditions thermiques du SERUL avec des températures négatives la nuit (période de refroidissement) et positives pendant la journée. L'équation 3-1 donne donc de bons résultats pour la prédiction de la profondeur de dégel en fonction de l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}), malgré le fait que ce n'est pas le même enrobé bitumineux qui est installé au SERUL (ESG-10) et dans la fosse d'essai (EB-10). La section sur le comportement mécanique va permettre de déterminer si cet indice peut être considéré comme un bon outil pour la gestion des restrictions de charge.

Aussi, Il serait intéressant de développer des relations entre la profondeur de dégel et l' ID_{50} pour chaque station météo routière (le MTMDET en possède 52) et sur un certain nombre de périodes hiver/printemps, la relation pourra ensuite être régionalisée selon les groupes de Stations météo routières (SMR) qui ont des profils thermiques similaires.

3.3 Comportement hydrique

Pour mesurer la variation de teneur en eau dans la chaussée, des jauges de teneur en eau volumétrique ThetaProbes ML2x ont été installées dans la fondation, la sous-fondation et le sol d'infrastructure. Ces jauges mesurent la permittivité diélectrique du sol afin d'estimer sa teneur en eau volumétrique.

Afin de calibrer les jauges, des échantillons de sol et de matériaux granulaires ont été prélevés dans les différentes couches de la structure de chaussée construites dans la fosse d'essai du laboratoire de l'Université Laval. La permittivité diélectrique de ces sols a été mesurée grâce aux jauges ThetaProbe et la teneur en eau a été aussi mesurée au laboratoire. La Figure 3-9 présente la courbe de calibration utilisée dans le cadre de ces essais.

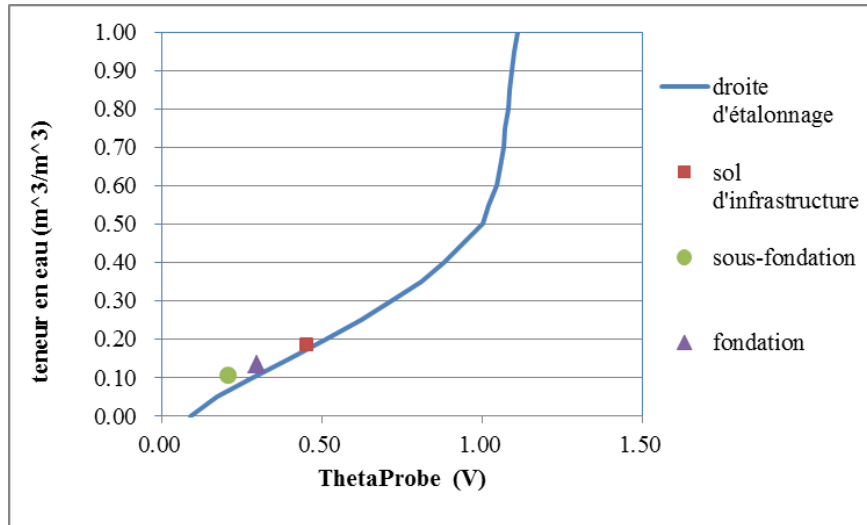


Figure 3-10 : Courbe de calibration des jauges ThetaProbe

Les équations 3-3 et 3-4 correspondent à l'équation de calibration des jauges de teneur en eau et l'équation de conversion des teneurs en eau volumétrique en teneur en eau massique :

$$\theta \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right) = 0,5202 * V - 0,0536 \quad [\text{Équation 3-3}]$$

$$w (\%) = \frac{\theta * \rho_w}{\rho_d} * 100 \quad [\text{Équation 3-4}]$$

Avec

θ : Teneur en eau volumétrique (m^3/m^3)

V : Voltage (V)

w : Teneur en eau massique (%)

ρ_w : Masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3)

ρ_d : Masse volumique sèche (kg/m^3)

Les masses volumiques sèches ont été obtenues à l'aide de l'essai du cône à sable (CAN/BNQ 2501-060/2005) effectué sur des matériaux granulaires utilisés pour la construction de la fosse d'essai au laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval et sur des échantillons de sol prélevés au SERUL. Les résultats obtenus sont 2240 kg/m^3 , 1930 kg/m^3 et 2124 kg/m^3 pour la fondation, la sous-fondation et le sol d'infrastructure respectivement.

Il est noté que les jauges de teneurs en eau n'ont pas fonctionné correctement dans la fosse d'essai pour les cycles II et III.

Voici quelques remarques sur le comportement hydrique entre les sections expérimentales au SERUL (100 mm et 200 mm) et le cycle I dans la fosse d'essai:

- ✓ L'évolution des teneurs en eau lors du dégel suit la tendance anticipée, soit des augmentations significatives jusqu'à l'atteinte d'un pic lors du dégel, puis une période de diminution assez lente jusqu'à la stabilisation au SERUL. Dans la fosse d'essai, les teneurs en eau se stabilisent avec leurs valeurs maximales puisqu'il n'y a pas de système de drainage.
- ✓ Les teneurs en eau dans la fondation et la sous-fondation atteignent leur maximum lorsque la profondeur de dégel est de l'ordre de 90 cm dans les sections 200 mm et 100 mm au SERUL ainsi que dans la fosse d'essai. Pour le sol d'infrastructure, la teneur en eau maximale est atteinte lorsque la profondeur de dégel est de l'ordre de 1,1 m.
- ✓ Avec la présence de sols gélifs entraînant la formation de lentilles de glace, les teneurs en eau dans le sol sont très élevées et peuvent atteindre jusqu'à 250 % à 325 % de leur valeur d'été.

3.4 Comportement mécanique

Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) impose la restriction de charges lorsque la profondeur de dégel dans une zone atteint plus de 300 mm. La fin de la période de dégel est déterminée 5 semaines après que la profondeur de dégel dans une zone ait atteint en moyenne 900 mm (MTMDET, 2015). Dans cette partie du rapport, le comportement mécanique de la structure de chaussée sera étudié selon les méthodes de gestion des restrictions de charge du MTMDET. Ainsi, selon la Figure 3-11, une profondeur de dégel de 300 mm dans la fosse

correspond à un indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) égal à 7 °C.jours.

La Figure 3-11 présente l'évolution de la profondeur de dégel ainsi que les déformations normalisées des couches d'enrobé bitumineux, de fondation et de sous-fondation en fonction de la racine carrée de l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) pour le cycle I dans la fosse d'essai. Les déformations normalisées ont été calculées avec l'équation 3-5

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_{temps\ t}}{\epsilon_{été}} * 100 \quad [\text{Équation 3-5}]$$

Avec :

ϵ_n : Déformation normalisée (%)

$\epsilon_{temps\ t}$: Déformation à un temps t ($\mu\epsilon$)

$\epsilon_{été}$: Déformation mesurée durant l'été ($\mu\epsilon$)

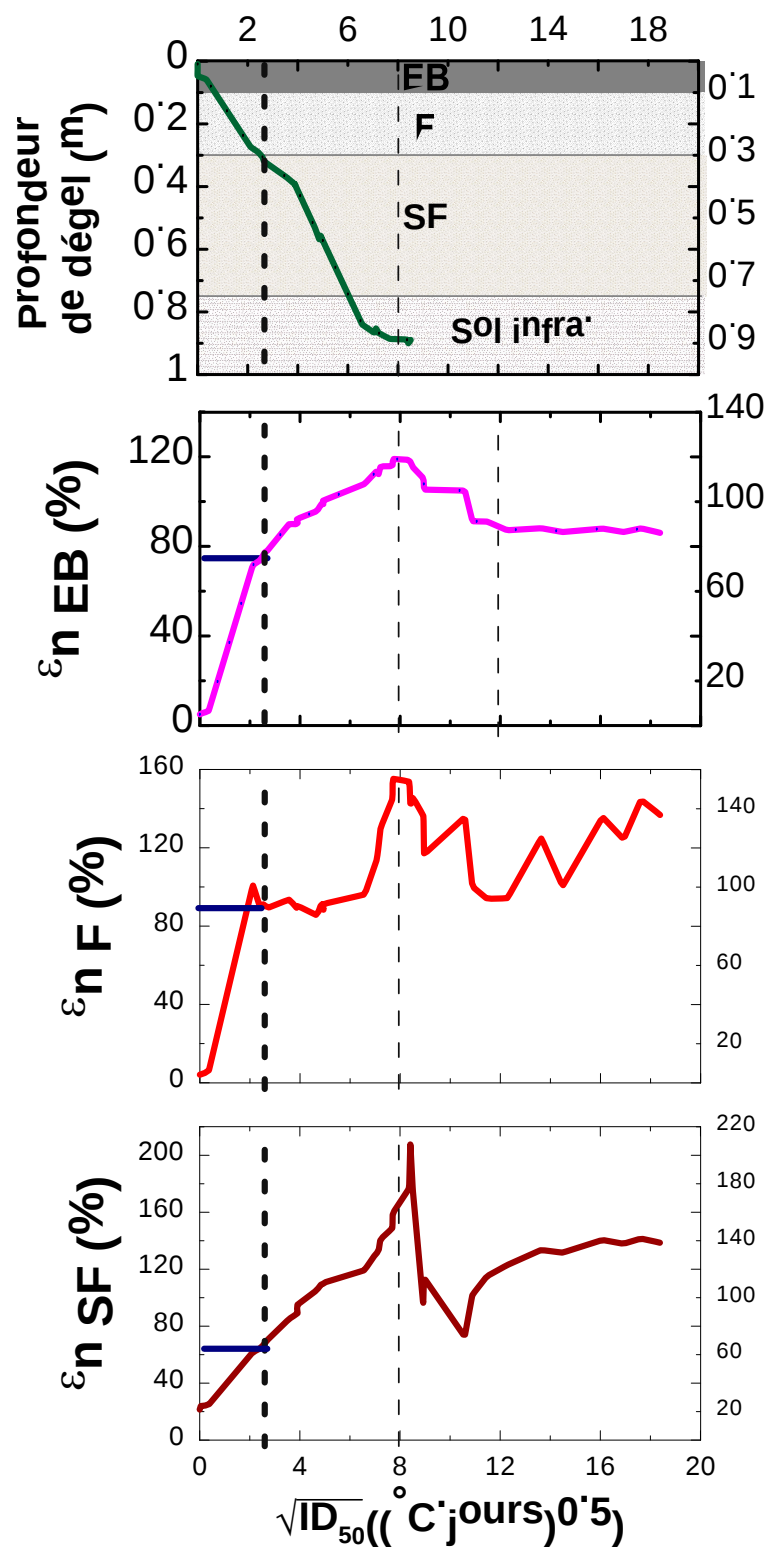


Figure 3-11 : Évolution de la profondeur de dégel et des déformations normalisées dans les couches de chaussées en fonction de $\sqrt{ID_{50}}$ pendant le cycle I de la fosse d'essai

D'après la Figure 3-11, il est possible de constater qu'avec un ID_{50} égal à 7 °C.jours, les déformations normalisées sont inférieures à 100 % (valeur conditions normales estivales) pour toutes les couches. Le Tableau 3-2 présente les valeurs des déformations normalisées au SERUL et pour les cycles d'essais I et II dans la fosse.

Tableau 3-2 : Déformations normalisées pour les cycles I et II dans la fosse d'essai et pour la section 100 mm au SERUL en 2015 pour un ID_{50} de 7 °C.jours

Essais	ID_{50} de 7 °C.jours				
	ϵ_n EB (%)	ϵ_n F (%)	ϵ_n SF (%)	ID_R (°C.jours)	Prof dégel (mm)
Cycle I	74	90	64	10	290
Cycle II	47	21	10	12	270
SERUL 100 mm 2015	54	36	0	10	170

Le Tableau 3-2 montre qu'avec un ID_{50} égal à 7 °C.jours, les déformations normalisées sont inférieures à 100 %. Les résultats de la section 100 mm au SERUL en 2014 n'ont pas été présentés, car les températures n'étaient pas disponibles au début du dégel (station météo défectueuse) pour calculer le ID_{50} . Aussi, les résultats du cycle III dans la fosse d'essai n'ont pas été présentés, car les jauges de déformations ne donnaient pas de signal au début du dégel pour ce cycle.

Dans le but d'optimiser la date à laquelle sera imposée la période des restrictions de charges, l' ID_{50} pour lequel les déformations normalisées sont autour de 100 % pour le cycle I a été déterminé à partir de la Figure 3-10 et est égal à 18,5 °C.jours. Le cycle I a été choisi, car les déformations normalisées pour ce cycle étaient plus grandes que celles des autres cycles et celles enregistrées au SERUL. Cette valeur d' ID_{50} égale à 18,5 °C.jours sera utilisée dans le calcul de l'endommagement pour voir si c'est un bon critère de gestion des restrictions de charges.

Aussi, les déformations dans les couches de fondation et de sous-fondation ont atteint leurs valeurs maximales lorsque la profondeur de dégel a atteint 90 cm pour les cycles I et III dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm en 2014 au SERUL. Dans la section 100 mm, la profondeur de dégel critique était de 1,65 m le 14 mai 2015. Cependant, il est important de rappeler que l'appareil FWD est tombé en panne le 28 avril 2015 lorsque la profondeur de dégel était à 1,04 m. Ainsi, entre le 28 avril et le 14 mai, aucun essai n'a été réalisé. Le comportement de la chaussée à cette période est donc inconnu. Par conséquent, il est impossible de déterminer si la déformation maximale a été réellement atteinte le 14 mai ou entre le 28 avril et le 14 mai (période qui aurait été plus cohérente avec les résultats obtenus en 2014).

La fin de la période d'imposition des restrictions de charges, soit 5 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 90 cm selon le MTMDET, était le 30 mai 2014 et le 26 mai 2015 sur la section 100 mm au SERUL. À ces deux dates, aucun essai n'a été effectué au SERUL. Par contre, des essais ont été effectués le 9 juin 2014 et le 29 mai 2015. Des interpolations linéaires ont donc été faites pour connaître les déformations normalisées correspondant à ces périodes. Le Tableau 3-3 présente les déformations normalisées calculées pour la section 100 mm le 30 mai 2014 et le 26 mai 2015.

Tableau 3-3 : Déformations normalisées des différentes couches de la chaussée au SERUL à la fin de la restriction des charges (30 mai 2014 et 26 mai 2015)

Essais	ϵ_n EB (%)	ϵ_n F (%)	ϵ_n SF (%)
SERUL 100 mm (2014)	-	161	122
SERUL 100 mm (2015)	86	90	108

D'après le Tableau 3-3, dans la section 100 mm au SERUL, il est possible de constater que les déformations normalisées à la fin de la restriction des charges dans la fondation et la sous-fondation sont supérieures aux déformations obtenues en conditions estivales en 2014 et la déformation dans la sous-fondation est aussi supérieure aux valeurs estivales en 2015. Une

analyse plus approfondie permettra de confirmer si la date de fin de restriction de charge doit être fixée à plus de 5 semaines après avoir atteint une profondeur de dégel de 0,9 m.

Le comportement mécanique de la chaussée ayant une épaisseur d'enrobé bitumineux de 200 mm est fortement influencé par les températures de l'enrobé bitumineux. Pendant l'été, le module dynamique de l'enrobé bitumineux est faible étant donné que les températures sont plus élevées. Cette diminution de la rigidité du revêtement a pour effet d'augmenter les contraintes et les déformations dans les autres couches de la chaussée. Les déformations pendant le printemps sont donc inférieures aux déformations estivales en 2014 et en 2015 comme présenté dans les 2 rapports précédents (Badiane et coll., 2015).

3.5 Conclusion

Selon les résultats obtenus, la restriction de charges avec un ID_{50} égal à 7 °C.jours permet de minimiser l'endommagement de la chaussée. Par contre, l'analyse approfondie des résultats collectés a permis de proposer une valeur de ID_{50} égale à 18,5 °C.jours. La date de la fin d'imposition de restriction de charge semble être prévue avant que la chaussée ne récupère complètement sa capacité structurale. Néanmoins, une analyse plus approfondie dans le chapitre 5 permettra de mieux évaluer les critères de gestion des restrictions de charges du MTMDET en quantifiant l'endommagement total réel obtenu pour les structures de chaussées au SERUL et dans la fosse d'essai au laboratoire de géotechnique routière de l'Université Laval.

Chapitre 4 : Modèle de prédiction des modules réversibles en fonction de la variation de la teneur en eau

4.1 Introduction

Ces dernières années, plusieurs modèles ont été développés et sont utilisés pour prédire le module réversible des matériaux non liés de la chaussée en fonction du degré de saturation. Toutefois, la plupart de ces modèles ont été développés en se basant sur des essais en laboratoire et non sur des essais in-situ. Salour (2015) a utilisé le modèle de prédiction du MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) avec des essais sur le terrain et a obtenu des résultats concluants. Le même modèle est utilisé pour les essais au SERUL dans le cadre de ce projet.

4.2 Modèle MEPDG

Ce modèle a été développé par l'Université d'Arizona et prédit les variations de modules réversibles relatifs en fonction de la variation du degré de saturation. (Witczak et coll, 2000 cité par Salour, 2015). Ce modèle assume que la masse volumique sèche du matériau est non affectée par la variation de la teneur en eau. Le modèle MEPDG est présenté par l'équation 4-1.

$$\log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b-a}{1+e^{(\beta+k_s(S-S_{opt}))}} \quad \text{[Équation 4-1]}$$

Avec

M_R : le module réversible à un temps t

M_{Ropt} : le module réversible en condition optimale (condition référence)

a : minimum de $\log (M_R / M_{Ropt})$

b : maximum de $\log (M_R / M_{Ropt})$

β : $\ln(-b / a)$

k_s : un paramètre de régression

$(S-S_{opt})$: la variation du degré de saturation exprimée en décimal.

Les paramètres a , b et k_s recommandés pour les matériaux grossiers et les matériaux fins sont présentés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Valeurs des paramètres a , b et k_s pour les matériaux grossiers et fins

Paramètres	Matériaux grossiers	Matériaux fins
a	-0,3123	-0,5939
b	0,3	0,4
k_s	6,8157	6,1324

Des essais Proctor ont été effectués sur des échantillons de sol prélevé au SERUL et sur du MG-112 utilisé pour la construction de la fosse d'essai. Les résultats sont présentés sur les Figure 4-1 et Figure 4-2.

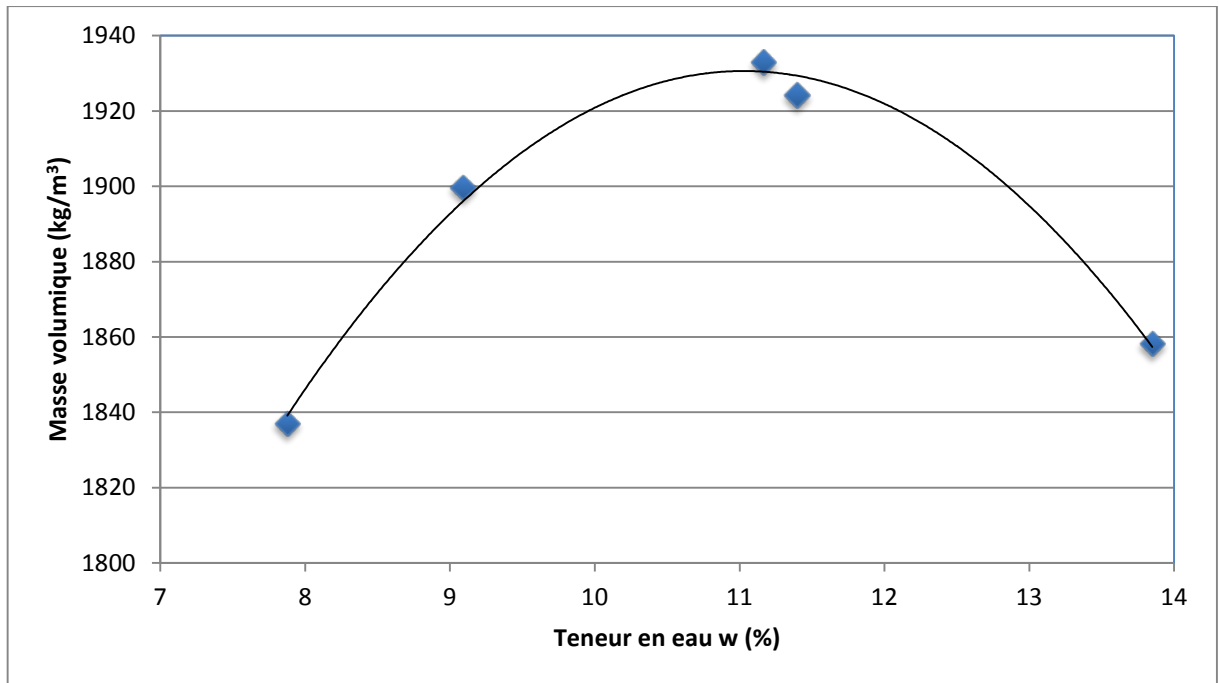


Figure 4-1 : Résultats de l'essai Proctor sur la sous-fondation (MG-112)

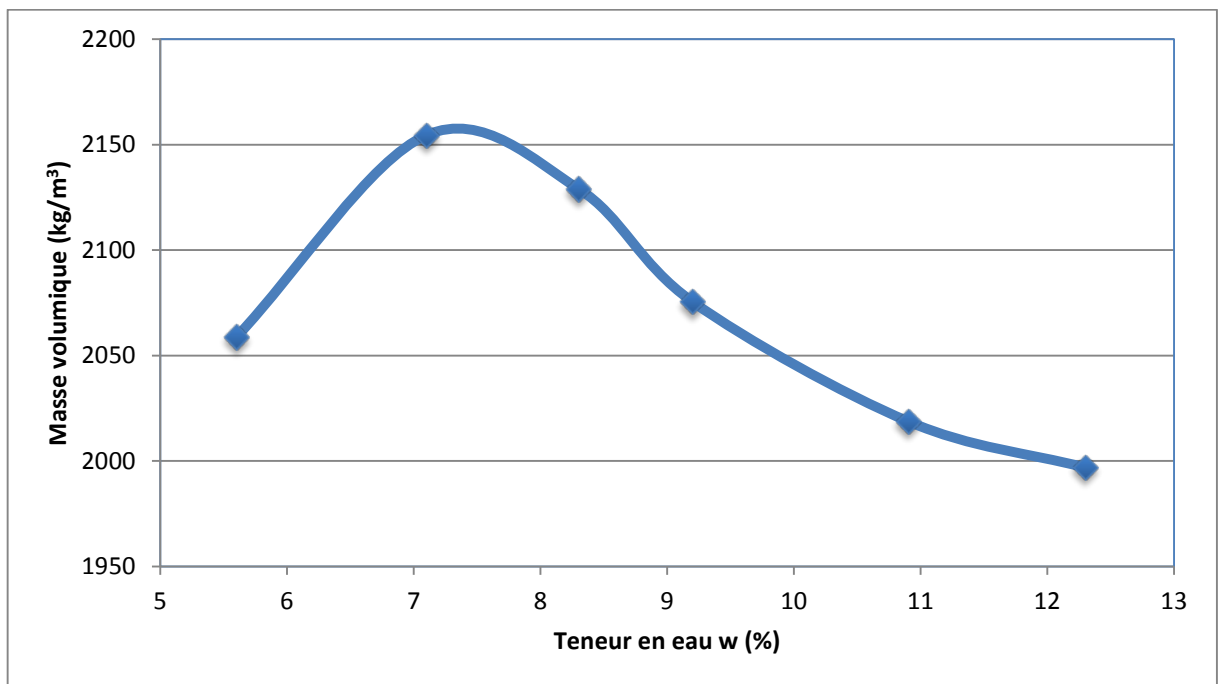


Figure 4-2 : Résultats de l'essai Proctor sur le sol d'infrastructure (SM)

Le Tableau 4-2 présente les masses volumiques sèches maximales ainsi que les teneurs en eau optimale de la sous-fondation et du sol d'infrastructure. Des essais Proctor n'ont malheureusement pas été effectués sur des échantillons de la couche de fondation (MG-20).

Tableau 4-2 : Teneur en eau optimale et masse volumique sèche maximale pour la sous-fondation et le sol d'infrastructure

	Masse volumique sèche maximale (kg/m ³)	Teneur en eau optimale (%)
Sous-fondation (MG 112)	1931	11,2
Sol d'infrastructure (SM)	2158	7,5

Pour la porosité, selon la littérature (Coté cité par Konrad, 2014 et Salour, 2015), la porosité pour la couche de sous-fondation et du sol d'infrastructure (sable silteux) est de 0,36 et 0,39 respectivement.

Les équations 4-2 et 4-3 permettent de calculer l'indice des vides (e) et le degré de saturation (Sr) :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{[Équation 4-2]}$$

$$Sr = \frac{w * G_s}{100 * e} \quad \text{[Équation 4-3]}$$

Avec

e : indice des vides

n : porosité

Sr : degré de saturation (%)

w : teneur en eau massique (%)

G_s : Gravité spécifique

4.3 Présentation des résultats

Les Figure 4-3 et Figure 4-4 illustrent le ratio des modules réversibles rétrocalculés en fonction du degré de saturation pour la sous-fondation et le sol d'infrastructure de la section 100 mm du SERUL en 2014. La ligne bleue a été tracée à l'aide des modules réversibles prédits par le modèle MEPDG obtenu avec l'équation 4-1. Les points de couleur orange ont été déterminés avec les modules réversibles obtenus par rétrocalcul avec le logiciel Elmod de Dynatest. Le module réversible rétrocalculé optimum correspond au module réversible calculé le jour où la teneur en eau de la couche concernée était proche de la teneur en eau optimale obtenue par l'essai Proctor. Pour la sous-fondation, le 12 mai 2014, la teneur en eau dans la sous-fondation était de 11,2 % et la teneur en eau optimale de 11,18 %. Le 26 mai 2014, la teneur en eau dans le sol était de 7,6 % et la teneur en eau optimale pour le sol de 7,5 %.

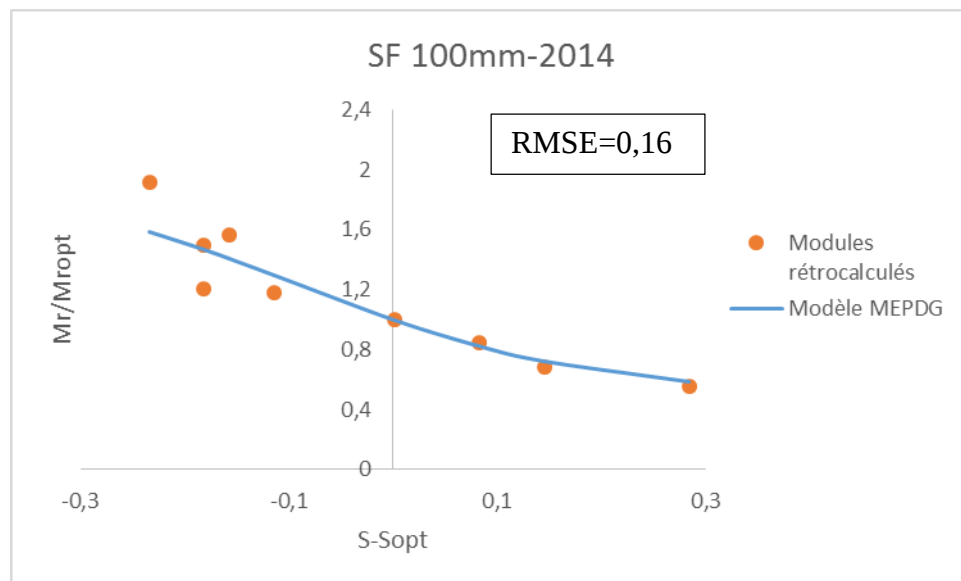


Figure 4-3 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation en fonction du degré de saturation.

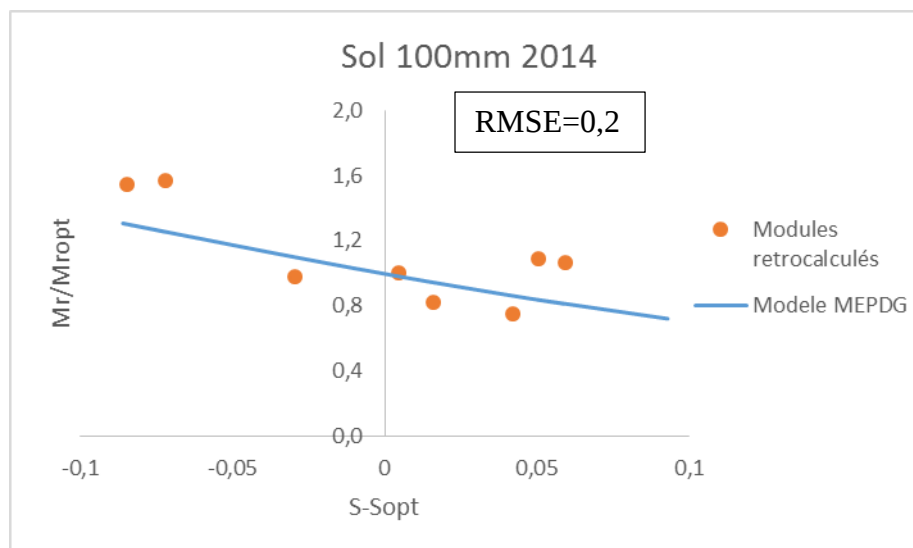


Figure 4-4 : Ratio des modules réversibles recalculés du sol d'infrastructure en fonction du degré de saturation

Les Figure 4-3 et Figure 4-4 montrent que le modèle choisi représente bien l'effet du changement du degré de saturation sur le module recalculé. Néanmoins, afin d'ajuster le modèle aux matériaux utilisés, les paramètres a et k_s ont été recalibrés grâce à l'outil «Solver» sur Excel afin d'affiner les résultats. Le Tableau 4-3 présente les valeurs recalibrées des paramètres a et k_s .

Tableau 4-3 : Recalibration des paramètres a et k_s

Couche	a	k_s
Sous-fondation	-0,3	7,66
Sol d'infrastructure	-0,40	9,77

Le paramètre b n'a pas été recalibré, car cette valeur est très conservatrice. Ce paramètre n'a subi aucune fluctuation malgré les nombreuses séries d'essais de laboratoire effectuées pour la calibration du modèle MEPDG. (ARA, 2004)

Les Figure 4-5 et Figure 4-6 illustrent les résultats obtenus avec la loi MEPDG en considérant les valeurs recalibrées des paramètres a et k_s et le ratio des modules recalculés pour la sous-fondation et le sol d'infrastructure de la section 100 mm en 2014.

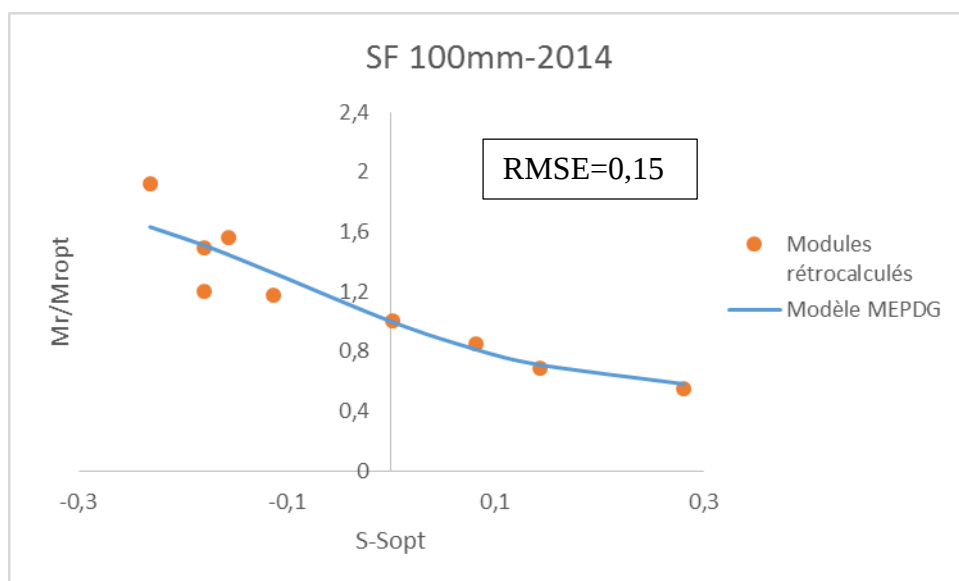


Figure 4-5 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation.

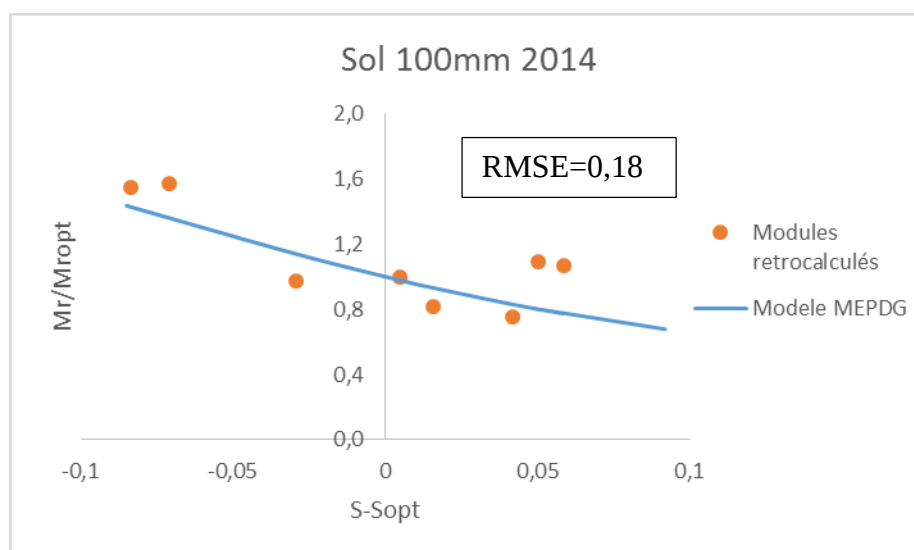


Figure 4-6 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation

En utilisant les paramètres recalibrés, une meilleure corrélation ressort entre les modules réversibles rétrocalculés et le degré de saturation. En effet, les erreurs RMSE sont plus faibles que celles calculées à partir des paramètres a et k_s initiaux (0,15 au lieu de 0,16 pour la sous-fondation et 0,18 au lieu de 0,2 pour le sol d'infrastructure). Ces nouveaux paramètres ont

donc été utilisés en 2015 dans la section 100 mm au SERUL et durant les deux années d'expérimentation dans la section 200 mm.

Le Tableau 4-4 présente les erreurs RMSE associées à chaque couche pour les sections 100 mm et 200 mm en 2014 et 2015. Les figures correspondantes sont présentées dans l'annexe C.

Tableau 4-4 : Erreurs RMSE et teneur en eau proche de l'optimum pour les sections 100 mm et 200 mm en 2014 et 2015 pour la couche de sous-fondation et de sol d'infrastructure.

	Sous-fondation		Sol d'infrastructure	
	RMSE	Teneur en eau la plus proche de l'optimum (%)	RMSE	Teneur en eau la plus proche de l'optimum (%)
100 mm 2015	0,3	8,8	0,9	5,5
200 mm 2014	0,4	11,1	0,7	9,4
200 mm 2015	0,4	11,8	0,9	5,6

D'après le Tableau 4-4, une bonne corrélation entre le ratio des modules prédits et calculés ressort dans la sous-fondation en 2014 et 2015 étant donné les RMSE faibles. Par contre, les corrélations ne sont pas bonnes dans le sol d'infrastructure. Cela peut être expliqué par le fait que la teneur en eau choisie comme optimale n'était pas proche de la teneur en eau réelle qui était de 7,5 % pour le sol d'infrastructure. En effet, lorsque la teneur en eau était proche de la teneur en eau optimale (100 mm en 2014), de bonnes corrélations ont été constatées pour le sol d'infrastructure.

De plus, concernant la section 200 mm, l'influence de la variation des teneurs en eau dans les sections avec un revêtement épais (> 100 mm) est moins importante que celle d'un revêtement mince (Huang, 2003 cité par Salour en 2015). Les erreurs RMSE constatées plus

élevées pour la sous-fondation du 200 mm (0,4 versus 0,3 et 0,2 pour la sous-fondation 100 mm) seraient donc normales.

4.4 Conclusion

Le modèle de prédiction des modules réversibles du MEPDG en fonction de la teneur en eau a permis d'obtenir de bons résultats, particulièrement dans la section 100 mm du SERUL. Les coefficients a et k_s constituant, en partie, ce modèle ont été recalibrés dans le cadre de ce projet. Ce modèle a été développé à partir d'essais en laboratoire, il serait intéressant de développer un modèle similaire basé sur des essais in-situ. L'utilisation de jauges de teneurs en eau dans les stations météo permettrait de prédire les modules des différentes couches de la chaussée et de mieux gérer les restrictions de charge.

Chapitre 5 : Endommagement par fatigue

5.1 Introduction

La détérioration des chaussées flexibles par l'action du trafic est habituellement associée à deux principaux mécanismes d'endommagement à long terme : la fissuration par fatigue et l'orniérage à grand rayon (Lachance, 1999). La fissuration par fatigue est causée par la flexion répétée du revêtement de la chaussée sous l'effet du passage répété des charges lourdes. D'après la théorie élastique, au niveau du comportement des couches sous chargement, les contraintes maximales en tension se situent à la base du revêtement (Ullidtz 1987 cité par Grellet, 2009). Cette tension n'excède pas la limite de rupture des matériaux de revêtement, mais sa répétition conduit au phénomène de fatigue. Dans le cas de l'apparition du phénomène de tension à la base du revêtement, la fissuration de fatigue progresse du bas de la couche vers le haut et se retrouve dans le sentier de roue. Ces fissures sont potentiellement très dommageables puisqu'elles interceptent l'écoulement de l'eau de surface qui, en s'infiltrant dans le corps de la chaussée, risque d'amplifier les mécanismes de dégradation de la chaussée. La dégradation ultérieure des fissures pourrait éventuellement avoir une importante contribution à la détérioration du confort de roulement pour les usagers. L'orniérage quant à lui se traduit par l'apparition d'une dépression longitudinale dans les sentiers de roue sous le passage répété des véhicules. Il trouve son origine dans le cumul des déformations visqueuses dues au liant bitumineux, des déformations plastiques dues au squelette minéral de l'enrobé (Jolivet et al., 2000 cité par Cuisinier et coll., 2007) et dans l'accumulation de déformation permanente au sein des massifs de sols et matériaux granulaires.

5.2 Calcul de l'endommagement par fatigue

Dans la littérature, plusieurs lois d'endommagement ont été proposées afin d'établir une durée de vie en fonction des sollicitations appliquées, généralement exprimées en

déformation, à une structure de chaussée. Dans le cadre de cette étude, le modèle de fatigue développé par l'Asphalt Institute a été utilisé et est illustré par les équations 5-1 et 5-2 :

$$N_F = 0,001135 * K_{F1} * |\varepsilon|^{-3,291} * E^{-0,854} \quad [\text{Équation 5-1}]$$

$$K_{F1} = 10^{4,84 * (\frac{V_{be}}{V_v + V_{be}} - 0,69)} \quad [\text{Équation 5-2}]$$

Avec

N_f = nombre d'application de charges admissibles

K_{F1} = Paramètre fonction de la teneur en vide et en bitume

ε = extension à la base du revêtement (m/m),

E = module élastique de l'enrobé bitumineux (MPa)

V_{be} = Teneur en bitume (%)

V_v = Teneur en vides (%)

5.2.1 Détermination du paramètre K_{F1}

Des essais en compression-traction directe ont été effectués sur des carottes d'enrobé bitumineux prélevées dans les deux sections expérimentales au SERUL et dans la fosse d'essai. Ces essais ont permis de déterminer la teneur en bitume et la teneur en vides pour le calcul du paramètre K_{F1} . Le Tableau 5-1 présente les valeurs de la teneur en bitume et de la teneur en vides des enrobés bitumineux du SERUL et dans la fosse.

Tableau 5-1 : Détermination du paramètre K_{F1} au SERUL et dans la fosse d'essai

Paramètres	SERUL 100 mm (ESG 10)	SERUL 200 mm (GB-20)	Fosse d'essai (EB 10)
V_{be} (%)	5,3	4,5	5,3
V_v (%)	5,2	5,8	3,3
K_{F1}	0,127	0,060	0,440

5.2.2 Détermination du module dynamique $|E^*|$

La valeur du module dynamique $|E^*|$ peut être déterminée à l'aide du modèle de Witczak (Witczak et Fonseca, 1996; Witczak 2005 cité par Perron-Drolet, 2015) tel qu'exprimé par l'équation 5-3.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{(\beta+\gamma\log f_r)}} \quad [\text{Équation 5-3}]$$

$$f_r = a_T * f \quad [\text{Équation 5-4}]$$

$$\log a_T = a_1 * (T - T_r) + a_2 * (T - T_r)^2 \quad [\text{Équation 5-5}]$$

Avec

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

f_r est la fréquence réduite (Hz)

δ , α , β , γ , a_1 et a_2 sont des coefficients de régressions dépendant du type de bitume utilisé.

a_T = facteur de translation (Hz) permettant de considérer l'influence de la température

f = fréquence de chargement (Hz)

T = température de l'enrobé bitumineux (°C)

T_r = la température de référence (°C), fixée à 10 °C

Les coefficients de régression δ , α , β , γ , a_1 et a_2 ont été déterminés à l'aide des essais en traction-compression directe présentés dans les annexes A et B pour le SERUL et la fosse d'essai.

Au SERUL, les caractéristiques de chargement du déflectomètre à masse tombante (FWD) ont été réglées afin d'obtenir une impulsion d'une durée entre 28 et 30 ms, soit environ une fréquence de chargement de 34 Hz, correspondant à la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km/h (Grenier, 2007). À chaque jour d'essai,

la température de l'enrobé bitumineux a été mesurée avec un thermomètre inséré dans un trou poinçonné au 2/3 de la profondeur de l'enrobé bitumineux et rempli d'un liquide témoin. Dans la fosse d'essai, la fréquence de chargement a été calculée avec l'équation 5-6 utilisée dans le logiciel i3c-ME (Doré, 2015). La température de l'enrobé bitumineux prise en compte correspond à la température mesurée à 50 mm de profondeur.

$$f = 0,46 * V \quad \text{[Équation 5-6]}$$

Avec

f : fréquence (Hz)

V : Vitesse de l'essieu (km/h)

5.2.3 Détermination des déformations à la base du revêtement de l'enrobé bitumineux ϵ

Des jauges mesurant la déformation horizontale ont été installées à la base des revêtements bitumineux dans les deux sections expérimentales au SERUL et dans la fosse d'essai.

Au SERUL, durant la première année d'expérimentation, les jauges de déformations n'ont pas pu être utilisées, car elles ont été brisées par une déneigeuse. Afin de pallier à cette perte de données, les déformations en traction à la base de l'enrobé bitumineux ont été calculées avec le logiciel Winjulea. Ce logiciel est basé sur l'analyse multicouche de systèmes linéaires élastiques. Certains paramètres doivent être connus pour effectuer les simulations, notamment les coefficients de Poisson de chaque couche, la charge axiale (kN) correspondant à l'application de la moitié d'un essieu simple de référence et l'aire de contact (mm²) de la plaque de chargement circulaire de rayon 150 mm du FWD utilisé pour simuler le passage d'un véhicule lourd. Le Tableau 5-2 présente les différents paramètres utilisés dans cette étude.

Tableau 5-2 : Paramètres utilisés pour la simulation avec Winjulea au SERUL

Matériaux	Coefficient de Poisson	Charges appliquées (kN)	Aire de contact (mm ²)
Enrobé bitumineux	0,35	• 40 (Charge référence) • 36 (Réduction de 10 % de la charge référence) • 32 (Réduction de 20 % de la charge référence)	70686
Fondation	0,35		
Sous-fondation	0,35		
Sol d'infrastructure	0,45		

Les modules réversibles utilisés pour les matériaux granulaires et le sol sont les modules obtenus par rétrocalcul avec le logiciel Elmod de Dynatest. Les modules dynamiques de l'enrobé bitumineux sont obtenus avec les essais de traction-compression directe. La Figure 5-1 présente un exemple de calcul de déformation en traction de la section 200 mm le 24 avril 2014.

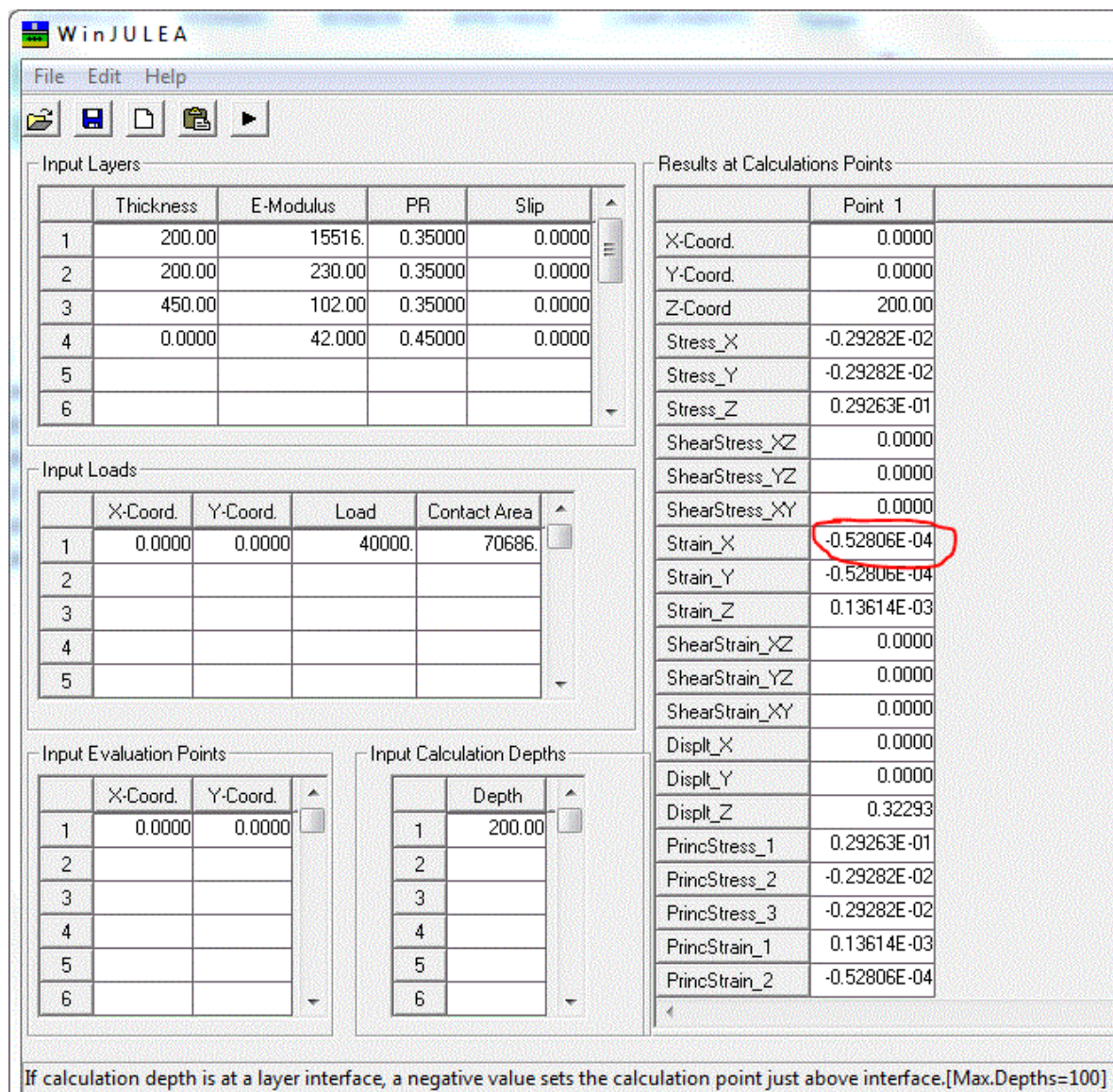


Figure 5-1 : Exemple calcul de la déformation en traction avec Winjulea le 24 avril 2014 pour la section 200 mm au SERUL

En 2015, de nouvelles jauges de déformations horizontales ont été installées, les résultats obtenus grâce à ces jauges et aussi les déformations mesurées par Winjulea ont été utilisés pour le calcul de l'endommagement. Les déformations obtenues par Winjulea vont permettre une meilleure comparaison avec les résultats de 2014.

5.2.4 Loi de Miner

La loi de Miner est largement utilisée en conception de chaussées pour calculer l'accumulation des dommages. Il se base sur l'hypothèse suivante : le dommage (D) accumulé dans la couche de revêtement est une fonction linéaire du ratio entre le nombre de répétitions de charge accumulée (ou prévue) (n) sur le nombre de répétitions de charge admissible (N_{adm}) (Perron-Drolet, 2015) comme le montre l'équation 5-7.

$$D = \frac{n}{N_{adm}} \quad [\text{Équation 5-7}]$$

Avec

D = dommage accumulé

n = Nombre de répétitions de charge prévue

N = Nombre de répétitions de charges admissibles

Étant donné que le nombre de répétitions de charges prévues est inconnu, une valeur de 1 a été posée. Les dommages dans le cadre de cette étude sont donc calculés de la façon suivante :

$$D = \frac{1}{N} \quad [\text{Équation 5-8}]$$

Avec

D = dommage accumulé

N = Nombre de répétitions de charges admissibles

Les dommages en fatigue ont été normalisés avec la valeur d'été et est présenté par l'équation 5-9.

$$D_{norm} = \frac{D_t}{D_{été}} \quad [\text{Équation 5-9}]$$

Avec :

D_t : dommage en fatigue calculé à un temps « t »

$D_{été}$: dommage en fatigue calculé à l'été

Les dommages à un temps « t » et pendant l'été peuvent aussi être exprimés de la façon présentée à l'équation 5-10 et 5-11 :

$$D_t = \frac{1}{N_t} \quad \text{[Équation 5-10]}$$

$$D_{été} = \frac{1}{N_{été}} \quad \text{[Équation 5-11]}$$

N_t et $N_{été}$ sont évalués avec l'équation 5-1.

L'équation 5-9 peut donc s'écrire :

$$D_{norm} = \frac{N_t}{N_{été}} \quad \text{[Équation 5-12]}$$

En tenant compte de l'équation 5-1, le dommage normalisé s'exprime aussi comme suit :

$$D_{norm} = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{été}}\right)^{3,291} * \left(\frac{E_t}{E_{été}}\right)^{0,854} \quad \text{[Équation 5-13]}$$

5.3 Analyse de l'endommagement total et des dommages saisonniers

Une analyse des dommages saisonniers permettra de connaître les dommages attribuables à chaque saison, principalement au printemps, et la proportion de vie utile consommée pour chaque saison au SERUL et dans la fosse d'essai.

5.3.1 Résultats obtenus au SERUL

La Figure 5-2 illustre la variation des températures de l'air à la forêt Montmorency pour l'année 2014.

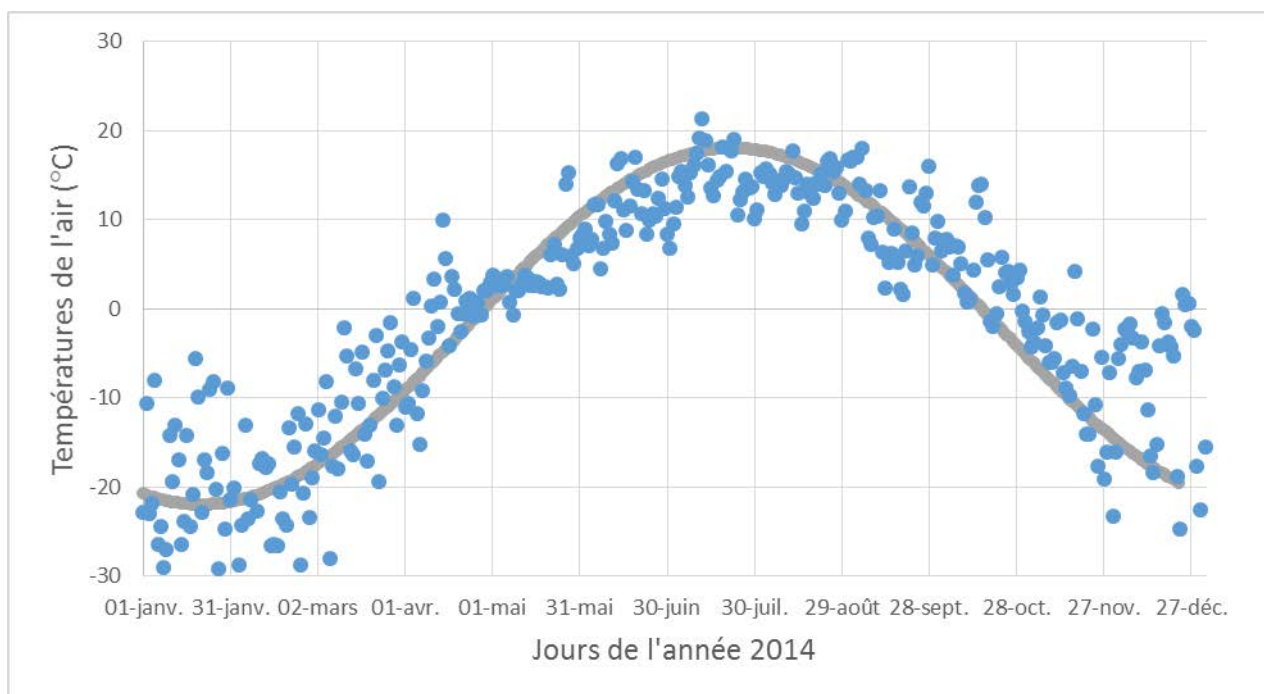


Figure 5-2 : Variation des températures de l'air à la Forêt Montmorency en 2014

Selon le guide du logiciel i3C-me (Doré, 2015), l'hiver est défini comme étant la période durant laquelle les températures modélisées sont inférieures à 0 °C. Sur la Figure 5-2, les deux points de la courbe sinusoïdale croisant l'axe à une température de 0 °C délimitent donc le début et la fin de l'hiver. Par conséquent, le printemps compte 57 jours et la période d'été, qui commence lorsque le printemps se termine, dure jusqu'au 20 septembre 2014. Finalement, l'automne est situé entre le 21 septembre et le début de l'hiver. Le Tableau 5-3 illustre les durées des différentes saisons.

Tableau 5-3 : Durée de chaque saison

Saisons	Hiver	Printemps	Été-Automne
Nombre de jours	153	57	155

Le 17 avril 2014, les déflexions obtenues par les essais au FWD étaient très faibles. Les températures de l'air négatives toute la semaine précédant cette date pourraient être à l'origine des faibles déflexions observées. En effet, la température moyenne de l'air tournait autour de -8 °C; il y a sûrement eu un refroidissement de la structure de chaussée. Le 17 avril, le module dynamique de l'enrobé bitumineux obtenu grâce à l'équation de Witczack était de 12430 MPa, les modules réversibles obtenus par rétrocalcul étaient de 1539 MPa, 843 MPa et 619 MPa pour la fondation, la sous-fondation et le sol respectivement. En hiver, les modules typiques d'une structure de chaussée avec une épaisseur d'enrobé bitumineux de 150 mm, de 200 mm pour la fondation et de 450 mm pour la sous-fondation sont de 10000, 1000, 800 et 500 MPa respectivement (Doré et Zubeck, 2009). Les résultats obtenus le 17 avril 2014 sont légèrement supérieurs mais tout de même en accord avec la littérature. Par conséquent, ils ont été choisis pour calculer l'endommagement saisonnier de la période hivernale.

Dans un premier temps, les critères du MTMDET concernant la période de restriction de charge (RC) ont été utilisés : le début est décrété lorsque la profondeur de dégel dans une zone a atteint plus de 300 mm. La fin de la période de dégel est déterminée cinq semaines après que la profondeur de dégel dans une zone ait atteint en moyenne 900 mm. (MTMDET, 2015). Le Tableau 5-4 présente les dates de début et de fin de la restriction des charges pour les structures de 100 mm et 200 mm au SERUL en 2014 et en 2015.

Tableau 5-4 : Dates de début et de fin de la période de restriction de charges au SERUL

	Dates de début	Dates de fin
Section 200 mm 2014	15 avril	4 juin
Section 200 mm 2015	15 avril	3 juin
Section 100 mm 2014	11 avril	30 mai
Section 100 mm 2015	13 avril	26 mai

Dans un second temps, d'après les résultats obtenus lors du suivi du comportement mécanique des structures de chaussée, les déformations mesurées dans les différentes couches sont inférieures à leur valeur en conditions normales pour un ID_{50} inférieur à 18,5 °C.jours et aussi la chaussée n'a pas encore complètement récupéré 5 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 90 cm. Au vu de ces résultats, la restriction des charges a été imposée en considérant qu'elle débute lorsque l' ID_{50} est égal à 18,5 °C.jours et se termine 6 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 90 cm, soit une semaine de plus par rapport aux critères du MTMDET.

Afin de calculer le dommage saisonnier, une réduction de 10 % (36 kN) et une réduction de 20 % (32 kN) ont été appliquées pendant la période de restriction des charges. Durant les autres saisons, seule la charge standard (40 kN) a été appliquée.

a. Endommagement pour la section 200 mm au SERUL

La Figure 5-3 et Figure 5-4 illustrent l'évolution des dommages en fatigue normalisés pour la section 200 mm au SERUL en 2014 et 2015 respectivement. Les déformations en traction dans l'enrobé bitumineux ont été obtenues avec le logiciel multicouche Winjulea. La Figure 5-5 montre l'évolution des dommages en fatigue normalisés pour la section 200 mm au SERUL en 2015. Ici, les déformations en traction de l'enrobé bitumineux ont été mesurées par la jauge de déformation.

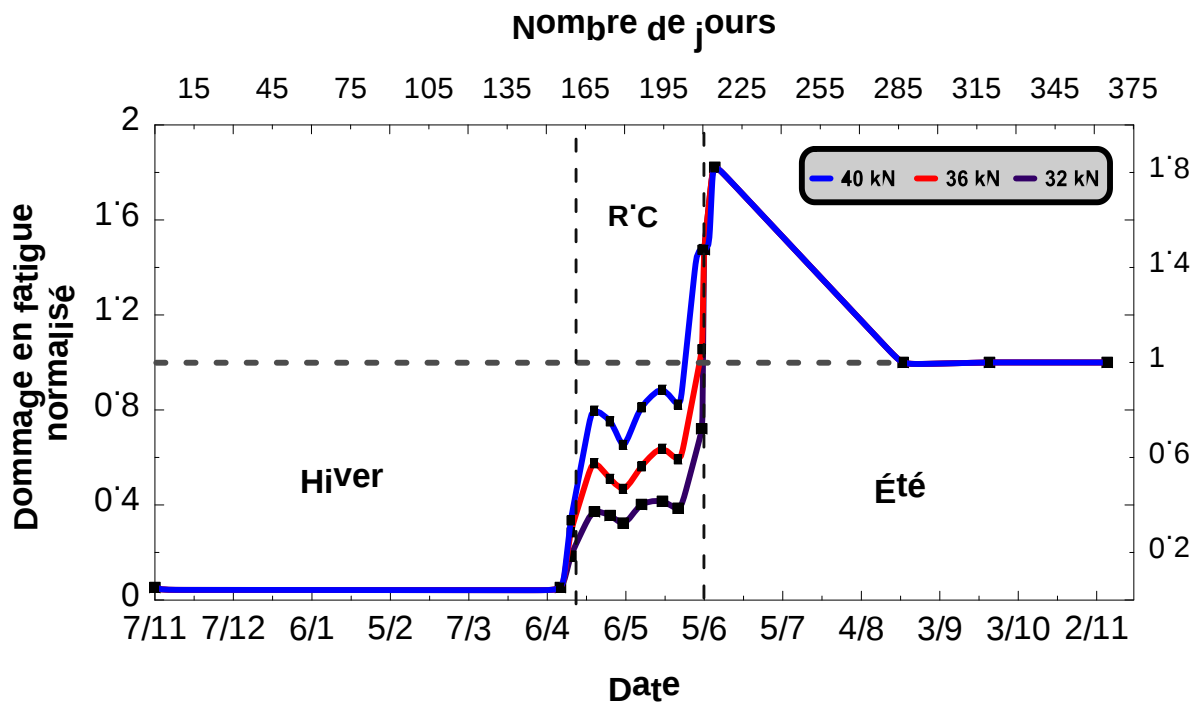


Figure 5-3 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

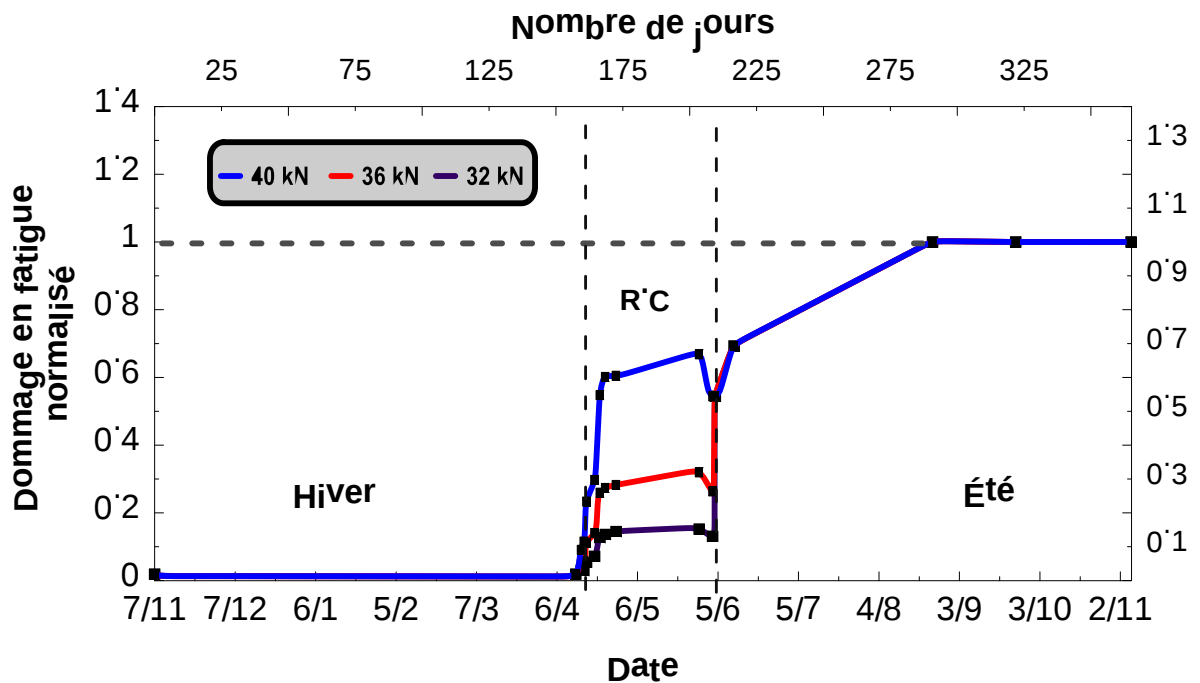


Figure 5-4 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

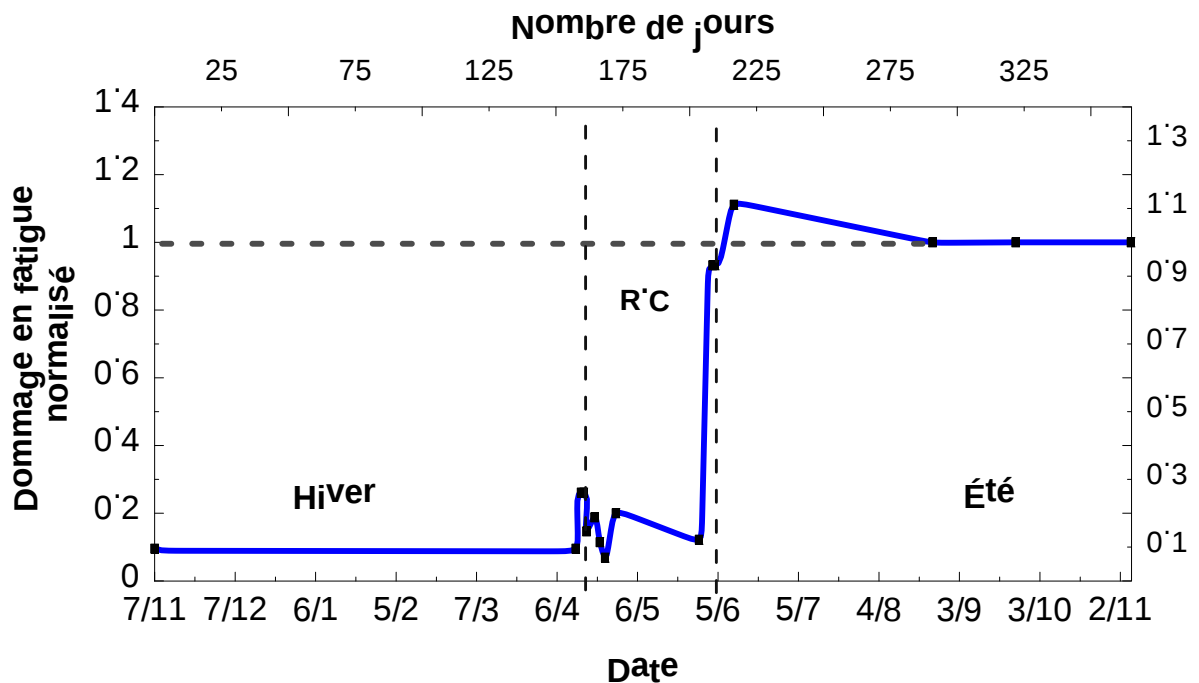


Figure 5-5 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformations)

Le Tableau 5-5 présente l'endommagement total de la section 200 mm au SERUL, pour les deux années d'expérimentation, avec et sans restriction de charge selon les critères du MTMDET. L'endommagement total correspond à l'aire totale sous chacune de ces courbes (Figure 5-3 à Figure 5-5). Ces valeurs d'endommagement sont calculées à partir de la méthode des rectangles, en utilisant la valeur des ordonnées du point de mesure (dommage en fatigue normalisé) comme hauteur du rectangle, et les demi-distances entre 2 points de mesure pour définir une valeur de temps comme largeur du rectangle.

Tableau 5-5 : Endommagement total pour la section 200 mm au SERUL selon les critères du MTMDET

	Charge standard (40 kN)	Réduction 10 % (36 kN)	Réduction 20 % (32 kN)
SERUL 200 mm (2014) (Winjulea)	0,82	0,79	0,76
SERUL 200 mm (2015) (Winjulea)	0,48	0,47	0,45
SERUL 200 mm 2015 (Jauges de déformation)	0,55	-	-

D'après le Tableau 5-5, l'endommagement total est inférieur à 1 en 2014 et 2015 (0,82 et 0,48 respectivement) sous une charge standard de 40 kN. Sur la Figure 5-3, le 9 juin 2014, les dommages normalisés étaient élevés. Cela peut s'expliquer par une température de l'enrobé bitumineux plus élevée à cette date. Les dommages normalisés ont atteint leur valeur estivale correspondant à 1 le 20 août 2014. Il est important de noter qu'il n'y a pas eu d'essai au SERUL entre le 9 juin et le 20 août 2014. Par conséquent, la valeur estivale a sûrement été atteinte plus tôt et l'endommagement total devrait être plus faible.

Les propriétés mécaniques de l'enrobé bitumineux sont fortement influencées par la température. Un revêtement plus chaud est moins rigide et est sujet à subir des déformations plus importantes sous une charge. Lors du passage d'un véhicule, cela affecte l'état de contraintes des matériaux sous-jacents et, ainsi, la rigidité des matériaux à comportement non linéaire (St-Laurent, 1995). Plus le revêtement est épais, plus sa rigidité influence de façon significative le comportement des matériaux sous-jacents. Pour cette raison, le comportement

d'une structure de chaussée, avec une couche d'enrobé bitumineux épaisse (≥ 100 mm), est fortement influencé par la température de l'enrobé bitumineux. Ainsi, les dommages en été sont plus importants que les dommages printaniers. Par conséquent, avec ou sans restriction de charge, l'endommagement total de la chaussée n'est pas très élevé. Le Tableau 5-6 présente le pourcentage d'endommagement associé à chaque saison dans la section 200 mm au SERUL et selon les critères du MTMDET.

Tableau 5-6 : Pourcentage de dommages en fatigue associé à chaque saison au SERUL dans la section 200 mm selon les critères du MTMDET

	Dommages saisonniers (%)		
	Hiver	Printemps	Été
SERUL 200 mm (2014) (Winjulea)	2	32	67
SERUL 200 mm (2015) (Winjulea)	1	38	61
SERUL 200 mm (2015) (Jauges de déformation)	7	18	76

D'après le Tableau 5-6, 61 à 76% des dommages sont associés à l'été, ce qui confirme que l'endommagement estival est plus important que l'endommagement hivernal dans les structures de chaussée avec une épaisseur d'enrobé bitumineux de 200 mm. Le pourcentage de dommage en hiver 2015, avec les jauges de déformation, est plus élevé. En effet, les déformations de l'enrobé bitumineux, le 17 avril 2014, étaient inconnues. Par conséquent, les déformations obtenues par Winjulea ont été choisies pour le calcul du dommage hivernal. Il est possible de remarquer aussi que l'endommagement obtenu avec les déformations calculées avec le logiciel Winjulea et celles mesurées avec les jauges donnent des résultats assez semblables.

En se basant sur ces observations, il n'est donc pas nécessaire d'imposer une période de restriction des charges pour une structure de chaussée similaire que celle étudiée avec une épaisseur d'enrobé bitumineux de 200 mm.

b. Endommagement pour la section 100 mm au SERUL

Les Figure 5-6 et Figure 5-7 montrent l'évolution des dommages en fatigue normalisés pour la section 100 mm au SERUL en 2014 et 2015. En 2014, les déformations en traction de l'enrobé bitumineux ont été obtenues grâce au logiciel multicouche Winjulea. La Figure 5-8 montre l'évolution des dommages en fatigue normalisés pour la section 100 mm au SERUL en 2015. Dans ce cas, les déformations en traction de l'enrobé bitumineux ont été mesurées par la jauge de déformation. Le Tableau 5-7 présente l'endommagement total obtenu avec les critères du MTMDET.

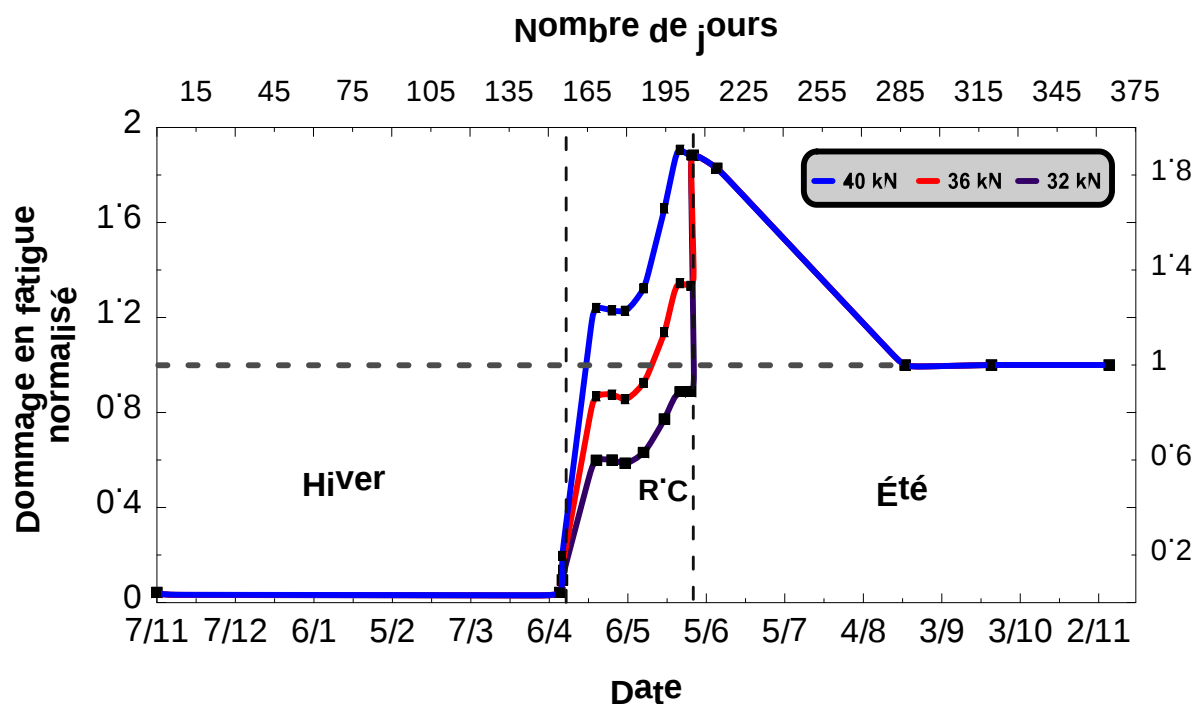


Figure 5-6 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

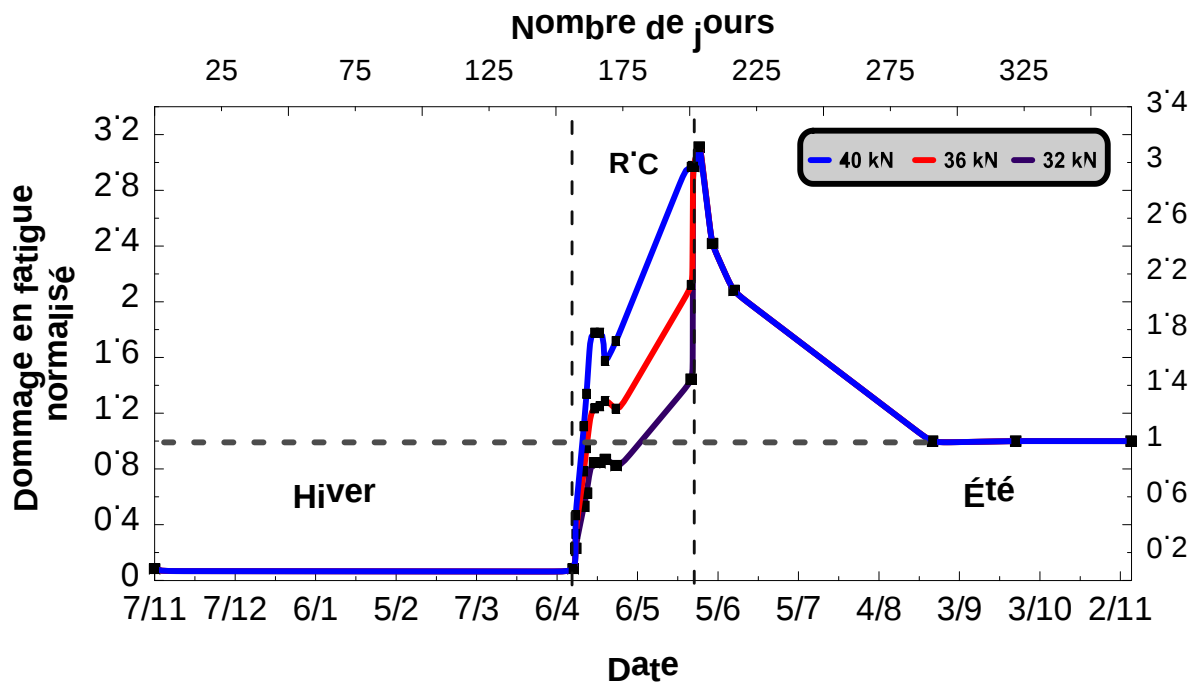


Figure 5-7 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

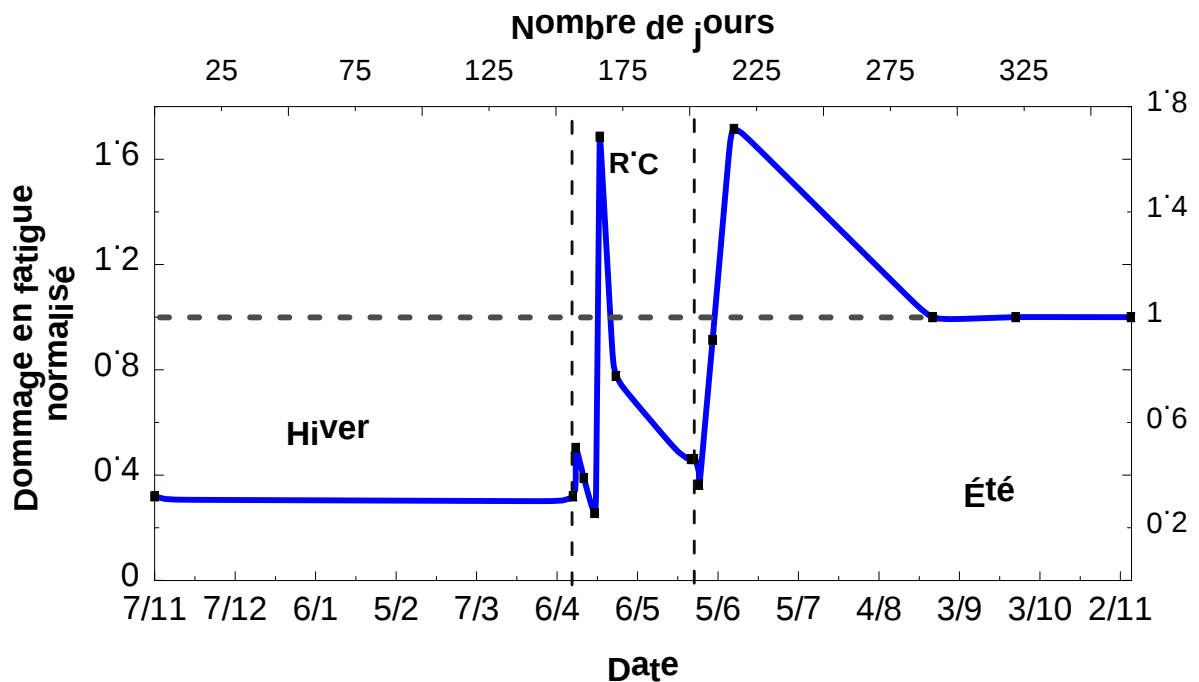


Figure 5-8 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformation)

Tableau 5-7 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères du MTMDET

	Charge standard (40 kN)	Réduction 10 % (36 kN)	Réduction 20 % (32 kN)
SERUL 100 mm 2014 (Winjulea)	0,93	0,9	0,86
SERUL 100 mm 2015 (Winjulea)	1,15	1,08	1,03
SERUL 100 mm 2015 (Jauges de déformation)	0,93	-	-

Dans la section 100 mm au SERUL, les dommages sont beaucoup plus élevés que ceux obtenus dans la section 200 mm au SERUL. Selon les déformations obtenues par Winjulea, l'endommagement total est 0,93 et 1,15 en 2014 et 2015 respectivement pour une charge de 40 kN, ce qui correspond à une augmentation de 24 % de l'endommagement en 2015 par rapport à 2014.

Les dommages, qui sont plus élevés en 2015, peuvent s'expliquer par un dégel plus rapide de la chaussée cette année-là (43 jours en 2015 par rapport à 50 jours en 2014). En effet, d'après Dysli et Pfister (1984), tiré de Girard (1996), lors d'un dégel lent et pour une profondeur de gel limitée, la faible perméabilité de la surface de contact entre les couches de fondation et le sol d'infrastructure permettra de maintenir une portance suffisante. À l'inverse, dans le cas d'un dégel rapide et pour une profondeur de gel limitée, cette perméabilité doit être beaucoup plus élevée pour assurer la pérennité de la chaussée.

Aussi, une autre explication peut être donnée concernant les dommages plus élevés obtenus en 2015. En effet, la surestimation de la valeur de référence (valeur d'été) pour le calcul des dommages normalisés peut contribuer à un résultat de dommages plus important. En effet,

les mesures d'été ont été prises alors que 28 mm de pluie était tombé la veille (MDDELCC, 2014) entraînant une augmentation de 26 % de la teneur en eau dans la couche de fondation, causant ainsi des déformations estivales élevées et des dommages normalisés au printemps plus faibles.

En 2014, il y a eu un gain de 7 % sur la durée de vie de la chaussée sous une charge de 40 kN; tandis qu'en 2015, il y a eu une perte de 15 %. En imposant une restriction de charges de 20 %, la perte sur la durée de vie diminue à 3 %. Cependant, l'objectif principal de la restriction de charges est de ne pas avoir de perte sur la durée de vie de la chaussée. Par conséquent, une restriction de charges supérieure à 20 % ou une période de restriction plus longue aurait été nécessaire pour l'année 2015 au SERUL selon les critères du MTMDET.

Le calcul de l'endommagement avec les déformations obtenues par les jauges ne donne pas les résultats attendus, les déformations de l'enrobé bitumineux fluctuaient beaucoup et ne suivaient pas l'allure de la température de l'enrobé bitumineux. Le Tableau 5-8 présente le pourcentage des dommages associés à chaque saison dans la section 100 mm selon les critères du MTMDET.

Tableau 5-8 : Pourcentage des dommages associés à chaque saison dans la section 100 mm au SERUL selon les critères du MTMDET

	Dommages saisonniers (%)		
	Hiver	Printemps	Été
SERUL 100 mm (2014) (Winjulea)	2	42	57
SERUL 100 mm (2015) (Winjulea)	2	50	48
SERUL 100 mm (2015) (Jauges de déformation)	7	19	75

Dans la section 100 mm du SERUL, les dommages relatifs au printemps sont plus élevés que dans la section 200 mm du SERUL. Ils sont de l'ordre de 50 % en 2015 et 42 % en 2014.

Rappelons qu'en 2014, la déformation référence (valeur d'été) était très élevée à cause de la pluie survenue la veille des essais. Il est donc possible que les dommages associés à l'été soient inférieurs à ceux présentés.

Dans un deuxième temps, la période de restriction de charge a été imposée en considérant qu'elle débutait lorsque l' ID_{50} était égal à 18,5 °C.jours et qu'elle se terminait 6 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 900 mm. Ainsi en 2015, dans la section 100 mm, la période de restriction de charges était du 14 avril au 3 juin 2015. Le Tableau 5-9 présente l'endommagement total obtenu avec ces critères.

Tableau 5-9 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères proposés selon les résultats de cette étude

	Charge standard (40 kN)	Réduction 10 % (36 kN)	Réduction 20 % (32 kN)
SERUL 100 mm (2015) (Winjulea)	1,15	1,07	0,99

D'après le Tableau 5-9, un gain de 1 % sur la durée de vie est observé pour une restriction de charges de 20 % selon les critères décrits précédemment. Ce gain de 1 % sur la durée de vie est comparé à une perte de 3% sur la durée de vie selon les critères du MTMDDET pour la même période.

Ces nouveaux critères seront appliqués dans le cas de la fosse d'essai pour des fins de comparaison.

5.3.2 Résultats obtenus dans la fosse d'essai

Cette partie concerne l'analyse des résultats obtenus à la fosse d'essai de l'Université Laval. Comme mentionné dans la section 5.3.1, le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDDET, 2015) préconise d'imposer le début de la période de restriction de charges lorsque la profondeur de

dégel a atteint 30 cm dans la chaussée et de terminer cette période cinq semaines après que la profondeur de dégel ait atteint en moyenne 90 cm. En appliquant les critères du MTMDET et d'après la Figure 5-9, le point rouge en bas à gauche représente le début de la période de restriction de charges qui correspond à une profondeur de dégel de 30 cm, tandis que le point rouge à droite indique la fin de la période de restriction de charges. Cette période correspond à une réduction de 20 % de la charge en vigueur. Dans ce projet, une réduction de 20 % de la charge de 5000 kg équivaut à une charge de 4000 kg.

Aussi, une analyse du dommage annuel saisonnier dans la fosse d'essai a été réalisée en considérant 5,2 mois d'été, 1,8 mois de printemps et 5 mois d'hiver ce qui correspond aux mêmes durées de saison qu'au SERUL (153 jours pour l'hiver, 57 jours pour le printemps et 155 jours pour la période été-automne). Ainsi, l'aire sous la courbe (ASC), présentant les dommages normalisés, correspond au dommage saisonnier pour chaque saison considérée. L'aire sous la courbe, pendant l'hiver, est égale à zéro. En effet, les dommages normalisés durant l'hiver sont nuls. Les longueurs des saisons considérées sont représentatives des conditions climatiques du sud du Québec. L'équation 5-10 a été utilisée afin de calculer le dommage total.

$$\text{Dommage total} = \frac{1,8 \times (\text{ASC printemps}) + 5 \times (\text{ASC hiver}) + 5,2 \times (\text{ASC été})}{12} \quad [\text{Équation 5-10}]$$

ASC printemps = aire sous la courbe durant le printemps.

ASC hiver = aire sous la courbe durant l'hiver.

ASC été = aire sous la courbe durant l'été.

La Figure 5-9 présente les dommages en fatigue normalisés pendant le cycle I d'essai dans la fosse. D'après cette figure, les dommages causés par une charge de 5000 kg (courbe rouge) sont plus importants que les dommages causés par une charge de 4000 kg (courbe bleue). En appliquant les critères d'imposition des restrictions de charges du MTMDET, d'après la Figure 5-9, l'évolution du dégel dans la chaussée durant la période de restriction de charges peut être divisée en trois phases :

- ✓ La première phase correspond au dégel effectif du sol. Durant cette phase, les dommages augmentent en fonction de l'avancement du front de dégel dans la chaussée avant d'atteindre des valeurs maximales de dommages normalisés de 2,25 et 1,50 causés par des charges de 5000 et 4000 kg respectivement. Cela implique une réduction de la capacité portante de la chaussée. De plus, les valeurs maximales des dommages correspondent à un indice de dégel de 65 °C.jours. Aussi, la phase du dégel effectif s'étend de 25 à 167 heures et correspond à un indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) de 7 à 65 °C.jours respectivement.
- ✓ La deuxième phase correspond à la période de récupération de la capacité portante de la chaussée qui se poursuit une fois le dégel des sols terminé. Durant cette période, l'eau apportée dans le système lors du dégel commence graduellement à s'évacuer permettant ainsi à la chaussée de récupérer sa capacité portante graduellement. Cela se manifeste par la diminution des dommages durant cette phase. Aussi, la phase de récupération correspond à un indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) de 65 à 100 °C.j.
- ✓ La troisième phase correspond aux conditions normales estivales. Durant cette phase, les teneurs en eau dans la chaussée sont à leurs valeurs minimales permettant ainsi à la chaussée de converger vers une valeur constante de capacité portante. Ainsi, les dommages tendent à une valeur de dommage équivalent annuel présentée par la ligne verte discontinue sur la Figure 5-9.

L'analyse des dommages saisonniers, effectuée en utilisant l'équation 4-10, a permis d'obtenir des dommages égaux à 0,94 et 0,82 pour des charges de 5000 et 4000 kg respectivement. Par conséquent, une réduction de 20 % de la charge implique une réduction du dommage annuel total de 13 %. De plus, une réduction de 20 % de la charge permet d'avoir un gain de durée de vie de 18 %.

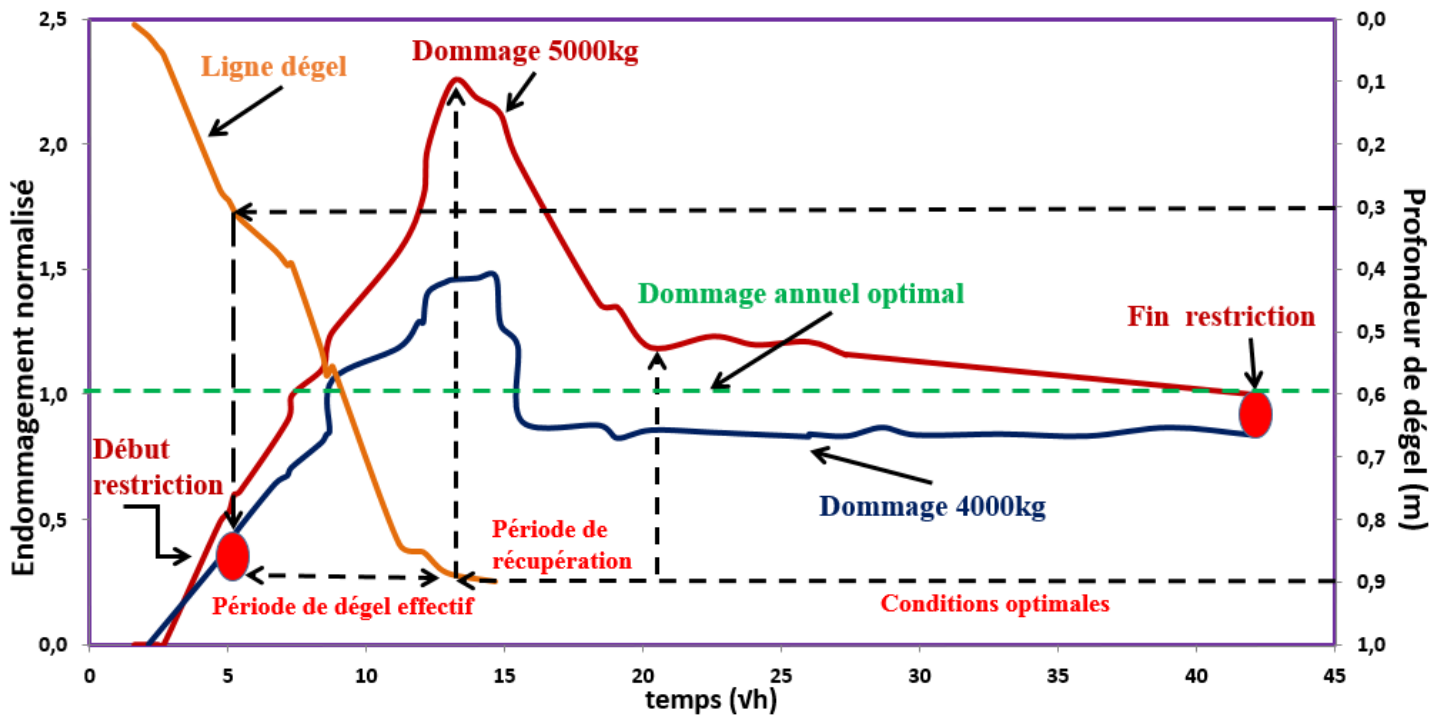


Figure 5-9: Dommages en fatigue normalisé durant le cycle I.

La Figure 5-10 présente le résultat de l'analyse des dommages saisonniers du cycle II en utilisant l'endommagement exprimé par les équations 5-9 et 5-10. D'après cette figure, les dommages augmentent en fonction de l'avancement du front de dégel dans la chaussée et aussi en fonction de la profondeur de dégel visée de 30, 60, 90 ou bien 120 cm. De plus, les dommages calculés sont en général inférieurs au dommage équivalent annuel (ligne discontinue verte). Par contre, l'avancement du front de dégel continu de pénétrer le corps de la chaussée, même si une alternance entre les températures positives et négatives est visible.

L'analyse des résultats obtenus avec cet essai a permis de conclure qu'au début du dégel, et particulièrement durant les jours où il y a une alternance entre les températures négatives durant la nuit et les températures positives durant le jour, il est préférable d'optimiser la période de restriction de charges étant donné les dommages très faibles observés.

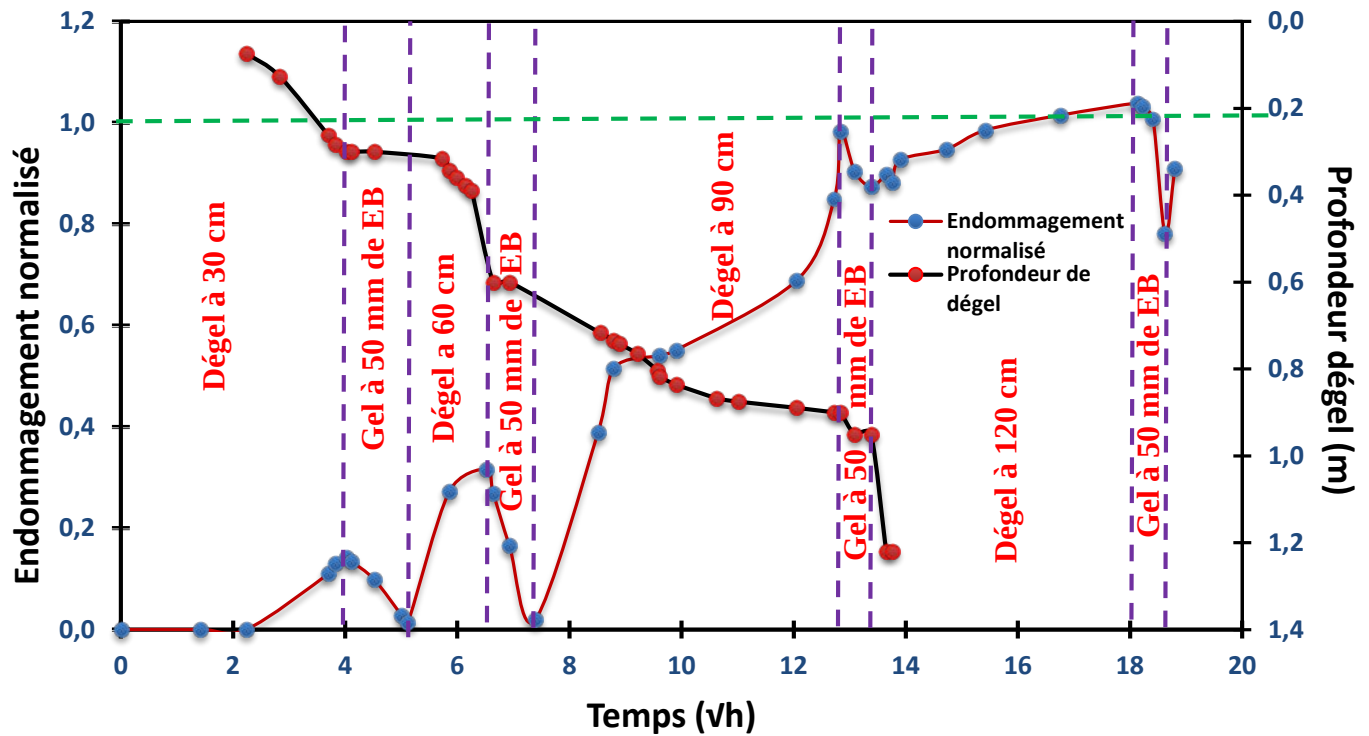


Figure 5-10: Dommages en fatigue normalisés durant le cycle II.

Les dommages en fatigue normalisés durant le cycle III, calculés avec l'équation 5-9, sont présentés à la Figure 5-10. D'après cette figure, les dommages causés par la charge de 5000 kg sont plus importants que les dommages causés par la charge de 4000 kg. En général, le comportement et l'allure des courbes obtenues sont identiques à ceux observés durant le cycle I. Cependant, l'amplitude des dommages est inférieure à celle obtenue durant le cycle I. La profondeur de la nappe phréatique de 800 mm durant le cycle III, en comparaison avec 1600 mm durant le cycle I, a probablement eu un impact sur le comportement mécanique de la chaussée.

Aussi, l'analyse des dommages saisonniers, calculés avec l'équation 4-10, a permis d'obtenir des dommages de 1,09 et 0,92 sous une charge de 5000 kg et de 4000 kg respectivement. Par conséquent, une réduction de 20 % de la charge implique une réduction du dommage annuel total de 16 %.

En comparant les résultats obtenus pour les cycles I et III, la nappe phréatique et l'âge de la chaussée semblent avoir un impact significatif sur le comportement mécanique de la structure. De plus, le début de l'application de la période de restriction de charges semble

varier dans le cas d'une chaussée assez vieille et une nappe phréatique plus proche de la surface (cas du cycle III), par exemple : durant le cycle I un dommage total d'une valeur de 0,94 sous une charge de 5000 kg a été obtenu. Par contre, un dommage total de 1,09 sous une charge de 5000 kg a été obtenu durant le cycle III.

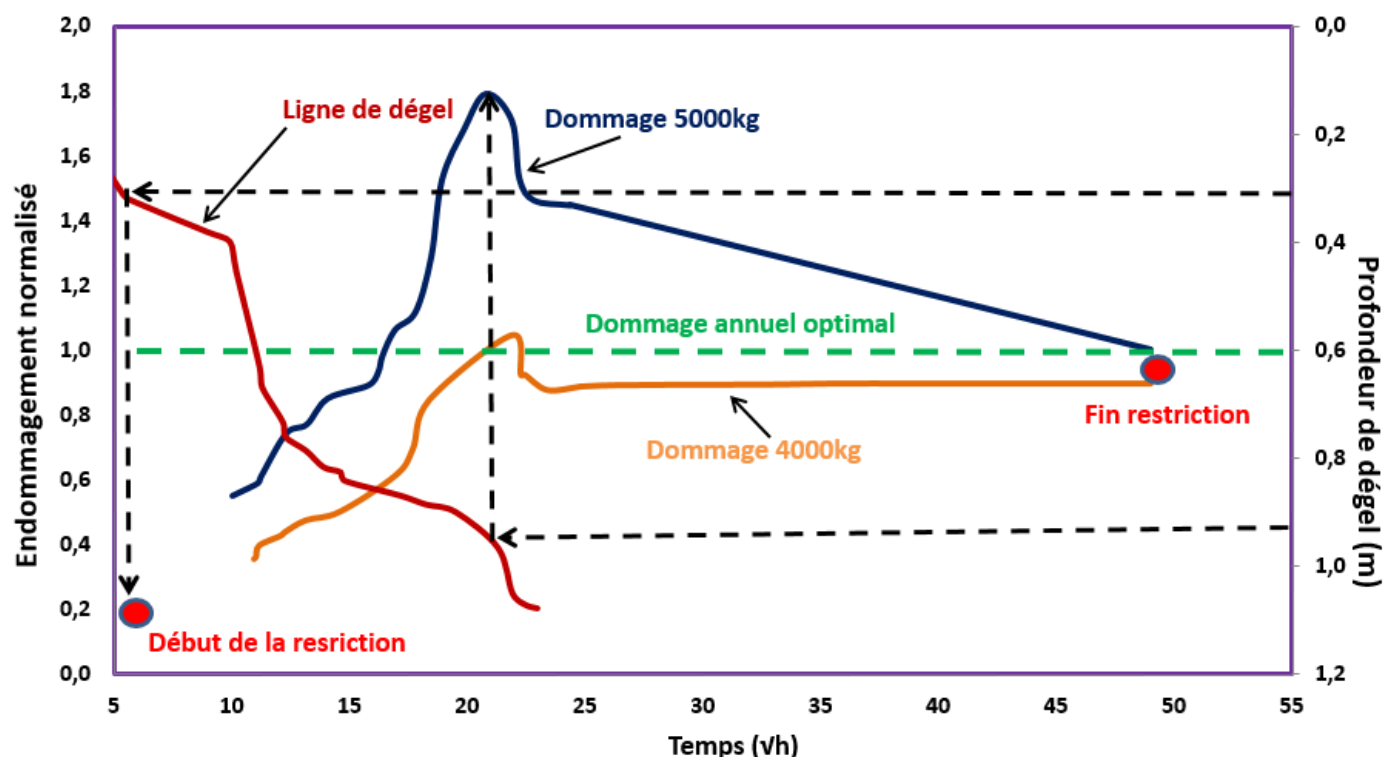


Figure 5-11: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle III.

L'analyse des dommages saisonniers pour le cycle I et III a montré que l'application des critères de restriction de charges du MTMDET correspond à un indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) de 7 °C.jour. Cependant, le dommage total calculé est inférieur à la valeur en conditions d'exploitation estivale (d'une valeur est égale à 1). Comme il a été proposé dans la partie sur l'analyse des dommages saisonniers au SERUL, la période de restriction de charges peut être optimisée en l'appliquant lorsque l'indice de dégel des températures à 50 mm (ID_{50}) est de 18,5 °C.jours au lieu de 7 °C.jours. L'analyse du dommage total a été effectuée pour le cycle I pour de telles conditions a donné des résultats de dommages saisonniers de 0.95 et 0.82 pour des charges de 5000 kg et de 4000 kg respectivement.

Concernant la fin de la période de restriction de charges, les essais dans la fosse se sont terminés 5 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 900 mm. Par conséquent, il n'a pas été possible de vérifier l'impact de la prolongation d'une semaine de la période de restriction de charge sur l'endommagement de la chaussée. Les critères du MTMDET ont donc été gardés pour la période de fin des restrictions de charge. Les résultats obtenus en utilisant le principe du dommage total sont présentés dans le Tableau 5-10.

Tableau 5-10: Endommagement total avec les critères des MTMDET et ceux proposés.

	Critères MTMDET		Critères proposés	
	5000 kg	4000 kg	5000 kg	4000 kg
Dommage total	0,94	0,82	0,95	0,82

D'après le Tableau 5-10, en utilisant les deux critères, le dommage total obtenu est presque le même. Cela signifie que les critères proposés d'application de restriction de charges sont satisfaisants.

5.4 Conclusion

L'analyse du dommage total, dans la fosse d'essai et au SERUL, a montré que l'application de la période de restriction de charges est nécessaire. En effet, le dommage total causé par les charges lourdes est inférieur au dommage estimé pour des mesures de comportement en conditions estivales. Aussi, cette analyse a montré que le début de la période de restriction de charges (critères du MTMDET) correspond à un indice de dégel à 50 mm de profondeur (ID_{50}) de 7 °C.jours. Cependant, afin d'optimiser la période de restriction de charges, un indice de dégel à 50 mm (ID_{50}) de 18,5 °C.jours a été proposé. Les résultats correspondants obtenus, suite à l'analyse du dommage total, dans la fosse et au SERUL semblent satisfaisants sur la base de ce critère.

Chapitre 6 : Discussion

Ce projet de recherche « Effet des charges en période de restriction des charges » a donné de bons résultats dans l'ensemble. En effet, avec les résultats obtenus, il a été possible de proposer des recommandations et des critères pour une meilleure gestion de la période des restrictions de charge. Néanmoins, plusieurs pistes d'améliorations peuvent être suggérées pour les projets futurs, elles sont détaillées dans les paragraphes suivants:

6.1 Discussion sur les essais au SERUL

Au SERUL, plusieurs phénomènes climatiques et environnementaux (la quantité de pluie, les températures de l'air mesurées pendant les essais, les couverts de glace qui recouvraient certaines jauges d'instrumentation, etc...) ont rendu difficile le suivi du comportement mécanique des structures de chaussées.

-En effet, par rapport à la pluie, la déformation estivale de la 2^e année d'expérimentation (2015) qui est prise comme référence pour le calcul de l'endommagement normalisé a été mesurée un lendemain d'une journée pluvieuse (28 mm de pluie) et donnait, avec la hausse de la teneur en eau dans la couche de fondation, des déformations plus élevées surestimant ainsi la valeur de référence. Pour une meilleure comparaison avec les résultats de 2014, il aurait été préférable de choisir le jour de mesure de la déformation estivale en fonction de la météo (journée sans pluie) ou de faire plus d'essais pendant l'été.

-Par rapport à la température, les essais au FWD sont généralement effectués entre 10h et 13h et parfois, dépendamment de la logistique, l'après-midi. Il a été remarqué que la température à mi-profondeur de l'enrobé bitumineux varie beaucoup dans la journée, ce qui affecte la rigidité de la chaussée. En effet, les différentes relations module-température proposées par la littérature conduisent approximativement à des variations de module de 2 à 5 % pour chaque degré Celsius d'écart (St-Laurent, 1995). Pour les projets futurs, il est donc

recommandé de faire les essais à la même heure ou de développer des modèles pour la correction des déformations et contraintes en fonction de la température.

-La section expérimentale avec une épaisseur d'enrobé bitumineux de 200 mm était recouverte en grande partie par un couvert de glace au début des essais au printemps. Ce couvert de glace modifiait l'albédo de la surface et ralentissait la progression du front de dégel. La section expérimentale avec une épaisseur d'enrobé bitumineux de 100 mm n'était pas recouverte quant à elle par de la glace. Une relation entre l'indice de dégel des températures de l'air et la profondeur de dégel dans les deux structures de chaussées est donc difficile vu que la vitesse de dégel de la chaussée est différente dans les deux sections.

-L'indice de dégel en surface a été calculé en multipliant par un facteur n égal à 2, l'indice de dégel des températures de l'air. Ce facteur n considère que la radiation solaire est la même à chaque jour d'essai, ce qui n'est pas vrai. Une thermistance qui donnerait les températures en surface permettrait un meilleur calcul de l'indice de dégel en surface et donc de meilleures relations entre l'indice de dégel en surface et la profondeur de dégel.

6.2 Discussion sur les essais dans la fosse

À la fosse, certains problèmes ont contribué à restreindre la quantité et la qualité des données recueillies. Par exemple, certaines jauges de déformations ont subi une extension lors du gel du sol et ont cessé de fonctionner. Cela a limité la quantité des données récoltées. Aussi, la jauge permettant de mesurer la déflexion a cessé de fonctionner durant le cycle II et III, ce qui a arrêté le suivi de la déflexion durant ces deux cycles d'essais. Autre problème a été rencontré durant les essais, particulièrement le cycle II et III, il s'agit des jauges qui mesurent la teneur en eau. Ces jauges ont cessé de fonctionner au début du dégel II. Finalement, il a été constaté que l'élévation des bordures de la chaussée ne suit pas le reste de la chaussée vu que le mur de la fosse limite le déplacement vertical du revêtement bitumineux.

Afin d'augmenter la quantité et la qualité des données durant l'essai gel-dégel, les recommandations suivantes sont proposées :

- Il faut adapter le fonctionnement des jauges aux extensions causées par le soulèvement au gel. Pour pallier aux problèmes rencontrés, il est proposé d'utiliser des jauges avec des plages de fonctionnement plus larges et d'utiliser des jauges de déformation électriques sur les porte-jauges comme solution de rechange en cas de perte de signal.
- Diminuer la friction entre le mur de la fosse et le corps de la chaussée en interposant un matériau souple entre le revêtement bitumineux et le mur de la fosse.
- Installer des jauges de déflexion qui se déplacent verticalement avec la chaussée par rapport un repère fixe.

Chapitre 7 : Synthèse des conclusions et recommandations

Les travaux effectués dans le cadre de ce projet et l'analyse des données récoltées (déformations, contraintes, teneur en eau et températures) dans la fosse d'essai et au SERUL ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Comportement thermique : les indices de dégel des températures à 50 mm de profondeur au SERUL sont assez semblables à ceux trouvés dans la fosse d'essai. Ainsi, une relation permettant de prédire la profondeur de dégel à partir de l'indice de dégel des températures à 50 mm (ID_{50}) a été établie. Par conséquent, cet indice (ID_{50}) peut être un bon outil à considérer pour la gestion de la période de restriction de charges.

Comportement hydrique : Le comportement hydrique dans les sections expérimentales du SERUL (100 mm et 200 mm) et durant le cycle I de gel dégel dans la fosse d'essai a été analysé. Quatre observations principales ont été faites :

- 1) L'évolution des teneurs en eau lors du dégel suit les tendances anticipées. En effet, au SERUL, une augmentation significative de la teneur en eau a été observée, jusqu'à l'atteinte d'un pic, pendant le dégel. Ensuite, une diminution assez lente de la teneur en eau a été constatée jusqu'à l'atteinte d'une valeur stable. Dans la fosse d'essai, les teneurs en eau se sont stabilisées à leurs valeurs maximales puisqu'il n'y a pas de drainage ou d'apport d'eau extérieur.
- 2) Les teneurs en eau dans la fondation et la sous-fondation ont atteint leur maximum lorsque la profondeur de dégel était autour de 90 cm dans les sections 200 mm et 100 mm au SERUL et dans la fosse d'essai. La teneur en eau dans le sol d'infrastructure a atteint sa valeur maximale lorsque la profondeur de dégel était autour de 1,04 m

- 3) En présence de sols gélifs sensibles à la formation de lentilles de glace, les teneurs en eau dans le sol peuvent atteindre jusqu'à 250 % à 325 % des valeurs mesurées en été.
- 4) L'étude du comportement hydrique dans la fosse d'essai n'a pas pu être complétée, car les jauges mesurant la teneur en eau ont arrêté de fonctionner pendant les cycles d'essais II et III.
- ✓ Comportement mécanique : selon les résultats obtenus, l'endommagement de la chaussée serait minimal lorsque la restriction de charges est imposée pour une profondeur de dégel de 300 mm (correspondant à un ID_{50} de 7 °C.jours). La profondeur de dégel requise correspond aux critères d'application des restrictions de charges du MTMDET en 2015. Par contre, afin d'optimiser la période de restriction de charges, un ID_{50} de 18,5 °C.jours est proposé considérant les conditions environnementales et les matériaux utilisés dans le cadre de ce projet.
 - ✓ Endommagement par fatigue : en appliquant les critères du MTMDET pour les restrictions de charges en 2015, soit une profondeur de dégel de 300 mm correspondant à un indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) égal à 7 °C.jours, l'analyse des dommages saisonniers a permis d'obtenir un endommagement total inférieur au dommage annuel obtenu en conditions d'été. De plus, l'analyse de l'endommagement total en utilisant un indice de dégel à 50 mm de profondeur (ID_{50}) égal à 18,5 °C.jours, a permis d'avoir un gain sur la durée de vie de la chaussée et d'optimiser la période de restriction de charges.

Le présent projet de recherche a permis de démontrer que l'application de restrictions de charges pendant la période de dégel est justifiée et efficace étant donné que l'endommagement total obtenu ne dépasse pas le dommage annuel considéré lors de la conception des chaussées. Aussi, l'analyse des données a confirmé le gain de la durée de vie de la chaussée en appliquant une période de restriction de charges. Cette étude a aussi permis de bien comprendre les mécanismes d'affaiblissement de la chaussée durant la période de

dégel. Une relation a été développée afin de prédire la profondeur de dégel à partir de l'indice de dégel ID_{50} . Finalement, le modèle MEPDG de prédiction des modules en fonction de la teneur en eau donne aussi de bons résultats en général suite au processus de calibration.

Les recommandations pouvant être formulées suite à la réalisation de ce projet sont les suivantes :

- ✓ Imposer la période de restriction des charges lorsque l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur est égal à $18,5^{\circ}\text{C} \cdot \text{jours}$ et lever la restriction de charges 6 semaines après que la profondeur de dégel ait atteint 900 mm, ce qui permet d'équilibrer les dommages totaux annuels (basé sur les résultats au SERUL et validé avec les essais avec le simulateur en laboratoire).

Toutefois, les critères utilisés par le MTMDET pour déterminer la période de restrictions de charges ont été déterminés suite à des essais sur l'autoroute 20, sur des tronçons-sections localisés dans la zone 1 (territoire couvrant le sud du Québec, soit les grands centres que sont Gatineau, Montréal, Sherbrooke, Trois Rivières et Québec, et s'étend jusqu'à Rivière-du-Loup) alors que la section d'essai au SERUL est située dans la zone 2 (territoire couvrant le nord de la zone 1). Il serait donc intéressant de collecter l'évolution des dommages normalisés en fatigue en fonction de l' ID_{50} à l'aide des 52 stations météo routières du MTMDET.

- ✓ Un suivi précis des teneurs en eau dans les couches de chaussées permettrait d'obtenir une meilleure prédiction des modules réversibles des matériaux granulaires et du sol et ainsi une meilleure gestion de la période de restriction de charges.

RÉFÉRENCES

ARA Inc., 2004. *Guide For Mechanistic-Empirical Pavement Design of New and Rehabilitated Pavement Structure*, Final Report, NCHRP 1-37A, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., USA.

Badiane M., Yi J., Doré G., Bilodeau J.P., 2014. Effet des charges en période de restriction des charges. Rapport GCT-2014-04, Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 274p.

Badiane M., El Youssoufy A., Doré G., Bilodeau J.P., 2015. Effet des charges en période de restriction des charges. Rapport GCT-2015-02, Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 166p.

Bilodeau J.P. et Doré G., 2013. Effet des charges en période de restriction des charges. Rapport GCT-2013-01, Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 39p.

Bradley A.H., Ahammed M.A., Hilderman S. et Kass S, 2012. Responding to climate change with rational approaches for managing seasonal weight programs in Manitoba. Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment. 11p.

C-SHRP 2000. Restrictions saisonnières de charge imposées au Canada et dans le monde. Bulletin technique, n° F21, 8p.

Cuisinier, D; Berthaud, Y et François, M. Orniérage des chaussées : identification des paramètres élasto-plastiques d'un enrobé bitumineux à partir d'un essai structurel. 18^e Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007, 6p.

Doré, G. and Zubeck, H., 2008. Cold regions pavement engineering. McGraw-Hill, New York

Doré, G., et Grellet, D., 2015. Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples i3C-me guide de l'utilisateur. Département de génie civil, Université Laval, 69p.

Doucet F., 2014, Mécanique des matériaux de chaussées-Comportement mécanique des enrobés. Cours GCI-718 : Enrobés bitumineux, Université de Sherbrooke, Québec, 28 février 2014

Dysli, M., 1991. Le gel et son action sur les sols et les fondations. Presses polytechniques, 250p.

Farcette, N, 2010. Développement et intégration d'une méthode de prédiction de soulèvement de structure de chaussées en contexte nordique dans le cadre d'une nouvelle approche rationnelles de conception des chaussées municipales. Projet de fin d'études INSA Strasbourg

Girard, N., 1996. Caractéristiques mécaniques d'infrastructures gélives durant la période de dégel. Mémoire de maîtrise présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada

Grellet, D., 2009. Évaluation de l'impact de la pression et des types de pneus sur la résistance des chaussées souples en condition printanières et estivales. 34 p.

Grenier, S., 2007. Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante. Thèse présentée à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada.

Konrad J-M., 2014, Propriétés thermiques des sols et des matériaux de construction. Cours GCI-7076 : Géotechnique des régions froides, Université Laval, Québec,

Lachance, D., 1999. Analyse mécanique de chaussées flexibles dans un contexte climatique nordique. Mémoire de maîtrise présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Dossier dégel : La protection du réseau routier : une priorité.https://www.mtq.gouv.qc.ca/centredocumentation/Documents/Usagers/V%C3%A9hicule%20lourd/D%C3%A9gel%20%20Restriction%20des%20charges/fiches_degel_2015 Consulté le 1^e octobre 2015

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2002. Données climatiques Sommaire mensuel de données quotidiennes. www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/donnees/sommaire.asp . Consulté le 15 septembre 2015.

Perron-Drolet, F., 2015. 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. Mémoire de maîtrise présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada

Saint-Laurent, D., 1995. Évaluation structurale de chaussées souples dans un contexte climatique nordique. Mémoire de maîtrise présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada

Saint-Laurent, D., 2003. Impact des restrictions de charges en période de dégel. Bulletin d'information technique INFO DLC, vol 8, N.11, 2p.

Salour, F. et Erlingsson, S., 2012. Pavement structural behaviour during spring thaw - Interpretation of FWD measurements by monitoring environmental data from county road 126 at Torpsbruk. VTI rapport 738A.

Salour, F. et Erlingsson, S., 2013. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Materials and Pavement Design*, 14:1, 141-158.

Salour, F., 2015. Moisture Influence on Structural Behaviour of Pavements. Doctoral Thesis, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Scullion, T., 1988. Incorporating a Structural Strength Index into the Texas Pavement Evaluation System. Texas Transportation Institute, FHWA/TX-88/409-3F. 78p.

Witczak, M., 2005. Simple performance tests: Summary of recommended methods and database, NCHRP Report 547, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 15

ANNEXES

Annexe A : Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe au SERUL

Section 2-ESG10 (100 mm) au SERUL

Transports Québec Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec G1P9W8	RAPPORTS D'ESSAIS - ENROBÉS ESSAIS EN TRACTION-COMPRESSION DIRECTE	Page : 1 de 2
---	--	---------------

ÉCHANTILLON Mode d'échantillonnage : Carottes Type d'échantillon : Carottes de 150 mm de diamètre Type d'enrobé : ESG-10 Usage : Couche de surface Date de réception :	EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Soumis par : Jean-Pascal Blodreau, UL Destinataire : Fitz Prophète, SC Numéro de dossier interne : AM-050-14
--	---

PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761236 - 761237 - 761238 Numéro d'échantillon : C-1 - C-2 - C-3 Prélève par : Steeve Gagnon, MTQ Date/Heure : 2014-10-09 00:00 Lieu : Sur la route Source de l'enrobé : Source de bitume : Lot :	Entrepreneur : Route/tronç./sect. : Planche d'essai SERUL - Sect. 2 Chaînage/décalage : Voie/emplacement dans la voie : Municipalité : Leclerc-Jacques-Cartier Source de granulats : Classe de bitume : PG 58-34
--	--

Centrale d'enrobage : 130 - Inter-Cité Construction Type d'essai à réaliser : Module complexe Remarque : Carottes C-1, C-2 et C-3 de la Section 2 Couche de surface	Formule d'enrobé : 07-602 Teneur en bitume : 5.30%
--	---

LC 28-700 Détermination du module complexe des enrobés

Mode de préparation : Carottage sur la route Hauteur des éprouvettes : 135 mm Diamètre des éprouvettes : 50 mm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Éprouvette :</th> <th>EB-069-15</th> <th>EB-070-15</th> <th>EB-071-15</th> </tr> <tr> <td>Dmax :</td> <td>2.445</td> <td>2.445</td> <td>2.445</td> </tr> <tr> <td>Débit :</td> <td>2.320</td> <td>2.318</td> <td>2.318</td> </tr> <tr> <td>% de vides :</td> <td>5.1%</td> <td>5.2%</td> <td>5.2%</td> </tr> </table>	Éprouvette :	EB-069-15	EB-070-15	EB-071-15	Dmax :	2.445	2.445	2.445	Débit :	2.320	2.318	2.318	% de vides :	5.1%	5.2%	5.2%
Éprouvette :	EB-069-15	EB-070-15	EB-071-15														
Dmax :	2.445	2.445	2.445														
Débit :	2.320	2.318	2.318														
% de vides :	5.1%	5.2%	5.2%														

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>E₀</th> <th>E_∞</th> <th>δ</th> <th>k</th> <th>h</th> <th>τ₀</th> <th>θ₁</th> <th>θ₂</th> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>32 800</td> <td>2.455</td> <td>0.156</td> <td>0.493</td> <td>0.015</td> <td>-0.142</td> <td>7.29E-04</td> </tr> </table> * A la température de référence (T_r) = 10°C	E ₀	E _∞	δ	k	h	τ ₀	θ ₁	θ ₂	0.1	32 800	2.455	0.156	0.493	0.015	-0.142	7.29E-04	MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>δ</th> <th>α</th> <th>β</th> <th>γ</th> <th>θ₁</th> <th>θ₂</th> </tr> <tr> <td>0.261</td> <td>4.196</td> <td>-1.404</td> <td>-0.402</td> <td>-0.145</td> <td>5.01E-04</td> </tr> </table> * A la température de référence (T_r) = 10°C	δ	α	β	γ	θ ₁	θ ₂	0.261	4.196	-1.404	-0.402	-0.145	5.01E-04
E ₀	E _∞	δ	k	h	τ ₀	θ ₁	θ ₂																						
0.1	32 800	2.455	0.156	0.493	0.015	-0.142	7.29E-04																						
δ	α	β	γ	θ ₁	θ ₂																								
0.261	4.196	-1.404	-0.402	-0.145	5.01E-04																								

Remarque :

Essais supervisés par : Christian Laroche, tech.	Date : 2015-08-28
--	-------------------

COMMENTAIRES DE L'APPROBATEUR

Original du rapport signé par :	
---------------------------------	--

Vérifié par : Maxime Laplante-Bolvin, ing. jr	Date : 2015-08-27
---	-------------------

MODÈLE HUET-GAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E^* (MPa)

$$E^* = E_s + \frac{E_u - E_s}{1 + \delta(j\omega\tau)^n + (j\omega\tau)^m}$$

$$\tau = a_T \cdot T_s$$

$$\log a_T = a_1(T - T_s) + a_2(T - T_s)^2$$

$T_s =$	10 °C
RMSE log E1 *	0.002
RMSE log E2 *	0.040
R ² log E1 *	0.99
R ² log E2 *	0.99
n *	100

E_s	E_u	δ	n	m	a_1	a_2
0.1	32 800	2.455	0.158	0.493	0.015	-0.142
						7.23E-04

MODÈLE WITCOZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG $|E^*|$ (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\log f - \log f_m) \beta}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_s) + a_2(T - T_s)^2$$

$T_s =$	10 °C
RMSE log $ E^* $ *	0.001
R ² log $ E^* $ *	1.00
n *	100
E_{max} *	1.8
E_{min} *	20 800

δ	α	β	T	a_1	a_2
0.261	4.196	-1.494	-0.402	-0.145	5.01E-04

Éprouvette : ED-070-15 Densité brute : 2.318

Densité max : 2.445 Teneur vides : 5.2%

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.8	10	617.8	33.9	5	24 111	3.8	24 063	1 528
-19.7	3	679.0	30.2	6	22 495	4.5	22 425	1 789
-19.7	1	625.2	29.4	7	21 255	4.7	21 154	1 732
-19.7	0.3	596.8	30.3	7	19 786	5.9	19 683	2 016
-19.7	0.1	568.8	30.9	8	18 435	6.8	18 314	2 113
-9.7	10	606.4	45.9	12	17 577	8.7	17 455	2 095
-9.7	3	642.1	40.5	11	15 058	7.8	15 711	2 158
-9.7	1	588.0	39.4	9	14 404	8.9	14 231	2 221
-9.7	0.3	519.1	40.6	7	12 770	9.9	12 580	2 196
-9.7	0.1	486.7	41.2	8	11 319	10.9	11 114	2 148
0.3	10	657.8	52.7	18	12 492	11.4	12 344	2 475
0.3	3	550.2	52.2	19	10 550	13.1	10 278	2 387
0.3	1	449.1	50.3	21	8 929	15.6	8 602	2 396
0.3	0.3	371.8	51.3	23	7 254	17.6	6 916	2 190
0.3	0.1	302.1	51.6	24	5 852	19.7	5 509	1 973
10.4	10	581.3	50.9	19	7 090	19.1	6 859	2 322
10.4	3	294.0	55.2	19	5 322	22.8	4 908	2 058
10.4	1	209.3	51.9	20	4 030	26.0	3 621	1 789
10.4	0.3	148.7	51.9	20	2 883	29.2	2 490	1 396
10.4	0.1	104.2	52.1	21	2 000	31.7	1 701	1 052
20.3	10	190.3	53.8	18	3 888	27.6	3 267	1 711
20.3	3	130.3	54.6	17	2 531	29.8	2 190	1 258
20.3	1	93.5	51.8	15	1 805	31.2	1 544	934
20.3	0.3	83.8	51.6	13	1 237	31.7	1 053	850
30.2	10	27.5	23.1	13	1 189	40.7	874	807
30.2	3	33.7	49.8	10	876	44.2	494	472
30.2	1	21.9	51.9	8	421	44.7	299	296
30.2	0.3	13.2	52.0	6	254	44.6	101	179
30.2	0.1	9.1	51.8	5	175	39.6	135	112
39.8	3	10.9	53.5	6	203	44.1	146	141
39.9	1	6.0	51.1	5	110	51.8	73	93
40.1	0.3	3.8	51.7	5	73	48.5	48	54
40.4	0.1	2.2	51.7	6	43	51.5	28	33

Éprouvette : ED-069-15 Densité brute : 2.320

Densité max : 2.445 Teneur vides : 5.1%

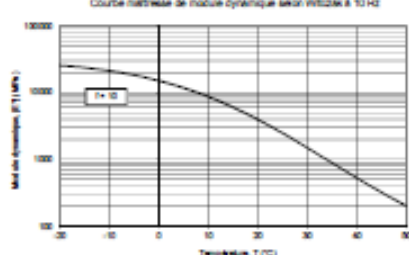
T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.8	10	786.1	34.0	33	23 194	3.9	23 139	1 558
-19.8	3	662.6	30.5	34	21 700	5.0	21 616	1 676
-19.8	1	605.4	29.6	33	20 425	5.7	20 325	2 019
-19.8	0.3	570.7	30.1	32	18 809	6.1	18 832	2 007
-19.8	0.1	541.4	31.1	32	17 390	6.8	17 267	2 085
-9.8	10	627.3	47.0	14	17 818	7.1	17 484	2 174
-9.8	3	647.2	40.9	15	15 809	8.1	15 853	2 215
-9.8	1	587.0	39.7	15	14 300	8.9	14 129	2 207
-9.8	0.3	511.8	40.5	15	12 645	10.1	12 450	2 211
-9.8	0.1	459.8	41.3	17	11 135	10.3	10 957	1 982
0.3	10	643.2	54.1	8	11 868	12.0	11 625	2 477
0.3	3	517.8	51.9	7	9 969	14.2	9 663	2 451
0.3	1	430.6	50.2	9	8 360	15.5	8 075	2 242
0.3	0.3	347.5	51.4	10	6 764	18.1	6 430	2 101
0.3	0.1	281.7	51.5	12	5 470	19.9	5 142	1 986
10.0	10	388.6	49.7	8	7 442	19.1	7 031	2 440
10.0	3	323.5	57.6	11	5 616	22.1	5 203	2 113
10.0	1	237.1	52.2	13	4 354	24.5	3 961	1 807
10.0	0.3	185.4	51.9	15	3 165	27.2	2 832	1 457
10.0	0.1	121.2	51.8	15	2 340	29.2	2 043	1 142
19.9	10	178.2	54.0	13	3 297	31.1	2 823	1 704
19.9	3	132.1	62.3	14	2 121	34.8	1 742	1 210
19.9	1	74.5	52.1	14	1 430	37.8	1 130	877
19.9	0.3	48.3	51.8	13	860	39.7	687	571
19.9	0.1	29.2	51.8	13	564	44.2	464	360
30.1	10	59.5	49.4	10	1 204	41.8	987	803
30.1	3	43.2	63.6	15	677	43.9	488	470
30.1	1	22.3	52.8	14	422	45.3	297	300
30.1	0.3	13.2	51.9	14	255	42.3	188	171
30.0	0.1	8.8	51.9	12	169	39.1	131	107
39.8	10	33.1	63.5	9	411	50.1	283	316
39.8	3	10.3	42.9	8	240	48.9	157	181
39.8	1	7.2	50.4	8	143	48.3	99	104
39.7	0.3	4.7	51.8	8	91	48.4	60	68
39.7	0.1	3.4	51.7	9	85	44.7	48	48

Éprouvette : ED-071-15 Densité brute : 2.318

Densité max : 2.445 Teneur vides : 5.2%

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.8	10	607.9	34.1	19	23 702	5.1	23 606	1 710
-19.8	3	673.3	30.4	19	22 127	5.1	22 041	1 954
-19.8	1	615.6	29.6	19	20 775	5.9	20 665	2 127
-19.8	0.3	582.8	30.2	18	19 277	6.1	19 169	2 036
-19.8	0.1	553.4	30.5	21	18 139	6.0	17 963	2 517
-9.7	10	646.3	48.8	8	18 063	6.8	17 972	2 086
-9.7	3	662.4	40.8	8	16 248	8.2	16 070	2 331
-9.7	1	583.9	39.7	9	14 720	9.4	14 521	2 414
-9.7	0.3	529.3	40.5	10	13 058	9.9	12 862	2 355
-9.7	0.1	473.7	41.2	11	11 490	11.3	11 290	2 250
0.2	10	646.5	53.8	9	12 071	12.0	11 808	2 506
0.2	3	526.5	52.0	11	10 119	14.1	9 615	2 464
0.2	1	426.2	50.2	13	8 490	16.4	8 145	2 396
0.2	0.3	351.0	51.3	16	6 846	18.1	6 508	2 126
0.2	0.1	282.7	51.5	18	5 488	20.4	5 143	1 917
10.1	10	375.1	50.0	12	7 556	18.9	7 159	2 448
10.1	3	328.1	58.8	14	5 777	22.0	5 358	2 161
10.1	1	233.0	52.0	15	4 482	24.1	4 089	1 833
10.1	0.3	171.1	52.0	17	3 288	26.8	2 936	1 482
10.1	0.1	125.1	51.7	18	2 419	28.4	2 127	1 151
20.0	10	170.8	51.8	14	3 294	30.0	2 852	1 640
20.0	3	127.9	59.6	14	2 148	34.1	1 778	1 205
20.0	1	75.5	52.2	13	1 448	37.8	1 144	887
20.0	0.3	47.4	51.9	12	913	39.3	707	578
20.0	0.1	30.5	51.3	10	583	41.5	444	363
30.1	10	71.9	51.3	8	1 400	38.5	1 096	871
30.1	3	48.0	58.5	8	850	40.8	648	553
30.1	1	28.9	52.8	8	547	41.0	413	369
30.1	0.3	18.2	52.0	8	351	40.3	268	237
30.0	0.1	12.8	51.8	8	243	47.1	185	178
39.8	10	43.9	65.2	6	515	43.9	371	367
39.8	3	14.5	44.9	5	323	43.2	235	221
39.5	1	10.8	49.4	5	215	38.8	173	128
39.5	0.3	7.5	51.8	4	145	41.9	108	97
39.5	0.1	4.9	51.7	4	95	34.0	79	53

Section 3-ESG 10 (200 mm) au SERUL

Transports Québec Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec G1P9W8		RAPPORTS D'ESSAIS - ENROBÉS ESSAIS EN TRACTION-COMPRESSION DIRECTE		Page : 1 de 2																
ÉCHANTILLON		EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION																		
Mode d'échantillonnage :	Carottes	Soumis par :	Jean-Pascal Blodieu, UL																	
Type d'échantillon :	Carottes de 150 mm de diamètre	Destinataire :	Fitz Prophète, SC																	
Type d'enrobé :	ESG-10	Numéro de dossier interne :	AM-050-14																	
Usage :	Couche de surface																			
Date de réception :																				
PRÉLÈVEMENT																				
No. de fiche d'échantillonnage :	761240 - 761241 - 761243	Entrepreneur :	Planche d'essai SERUL - Sect. 3																	
Numéro d'échantillon :	C-5 - C-6 - C-8	Route/tronç./sect. :																		
Prélevé par :	Steeve Gagnon, MTQ	Chânage/décalage :																		
Date/Heure :	2014-10-09 00:00	Voir l'emplacement dans la voie :																		
Lieu :	Sur la route	Municipalité :	Les-Jacques-Cartier																	
Source de l'enrobé :		Source de granulats :																		
Source de bitume :		Classe de bitume :	PG 58-34																	
Lot :																				
Centrale d'enrobage :	130 - Inter-Cité Construction	Formule d'enrobé :	07-602																	
Type d'essai à réaliser :	Module complexe	Teneur en bitume :	5.30%																	
Remarque :	Carottes C-5, C-6 et C-8 de la Section 3 Couche de surface																			
LC 28-700 Détermination du module complexe des enrobés																				
Mode de préparation :	Carottage sur la route	Éprouvette :	EB-073-15	EB-074-15																
Hauteur des éprouvettes :	135 mm	Dmax :	2.445	2.445																
Diamètre des éprouvettes :	50 mm	Dtruite :	2.366	2.366																
		% de vides :	3.2%	3.8%																
MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) <table border="1"> <thead> <tr> <th>E₀</th> <th>E_∞</th> <th>α</th> <th>k</th> <th>h</th> <th>τ₀</th> <th>θ₁</th> <th>θ₂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20.1</td> <td>35.100</td> <td>2.557</td> <td>0.165</td> <td>0.505</td> <td>0.027</td> <td>-0.148</td> <td>8.54E-04</td> </tr> </tbody> </table> * A la température de référence (T_r) = 10°C					E ₀	E _∞	α	k	h	τ ₀	θ ₁	θ ₂	20.1	35.100	2.557	0.165	0.505	0.027	-0.148	8.54E-04
E ₀	E _∞	α	k	h	τ ₀	θ ₁	θ ₂													
20.1	35.100	2.557	0.165	0.505	0.027	-0.148	8.54E-04													
MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG E* (MPa) <table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>α₁</th> <th>β</th> <th>γ</th> <th>θ₁</th> <th>θ₂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.675</td> <td>3.811</td> <td>-1.362</td> <td>-0.422</td> <td>-0.147</td> <td>6.03E-04</td> </tr> </tbody> </table> * A la température de référence (T_r) = 10°C					α	α ₁	β	γ	θ ₁	θ ₂	0.675	3.811	-1.362	-0.422	-0.147	6.03E-04				
α	α ₁	β	γ	θ ₁	θ ₂															
0.675	3.811	-1.362	-0.422	-0.147	6.03E-04															
Remarque : 																				
Essais supervisés par : <u>Christian Larochelle, tech.</u> Date : 2015-08-26																				
COMMENTAIRES DE L'APPROBATEUR																				
Original du rapport signé par :																				
Vérifié par : <u>Maxime Laplante-Bolvin, ing. jr.</u> Date : 2015-08-27																				

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E^* (MPa)

$$E^* = E_s + \frac{E_r - E_s}{1 + \delta(j\omega\tau)^k + (j\omega\tau)^n}$$

$$\tau = a_T \cdot \tau_s$$

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

E_s	E_r	δ	k	n	τ_s	a_1	a_2
20.1	30 100	2.557	0.185	0.505	0.027	-0.146	0.546E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, $\log |E^*|$ (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{a}{1 + e^{(b - T_{ref})/c}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

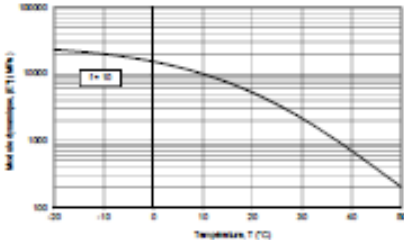
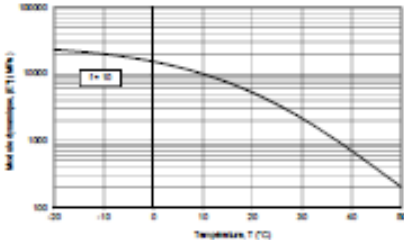
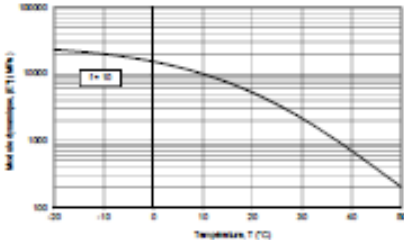
δ	a	b	c	T_{ref}	a_1	a_2
0.875	3.811	-1.362	4.422	-0.147	6.03E-04	

Éprouvette : ED-073-15			Densité brute : 2.366					
Densité max : 2.445			Teneur vides : 3.2%					
T	f	σ	ϵ	CV_e	β	θ	E^*	E_2
(°C)	(Hz)	(kPa)	($\mu\epsilon$)	(%)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
-19.6	10	849.3	32.1	33	26 419	3.3	26 375	1 531
-19.6	3	740.8	29.8	33	24 882	3.7	24 841	1 594
-19.6	1	686.2	29.1	32	23 544	4.9	23 456	2 030
-19.6	0.3	661.7	30.1	31	21 969	5.8	21 866	2 129
-19.6	0.1	632.2	30.8	29	20 511	6.2	20 361	2 218
-9.7	10	936.4	43.4	20	20 967	6.5	20 833	2 356
-9.7	3	780.6	39.9	19	19 050	7.7	18 879	2 544
-9.7	1	661.5	36.2	18	17 368	8.4	17 177	2 550
-9.7	0.3	625.1	40.5	17	15 500	9.2	15 302	2 469
-9.7	0.1	586.6	41.3	17	13 802	10.2	13 564	2 441
0.3	10	709.8	48.2	17	14 738	10.9	14 472	2 779
0.3	3	626.3	50.1	19	12 490	12.1	12 211	2 824
0.3	1	526.6	49.8	22	10 618	14.3	10 269	2 822
0.3	0.3	446.8	51.4	26	8 691	16.2	8 345	2 427
0.3	0.1	386.3	51.4	30	7 120	14.3	6 907	1 783
10.1	10	437.7	48.8	25	6 962	18.1	6 517	2 790
10.1	3	379.2	55.8	29	6 795	20.8	6 350	2 417
10.1	1	273.7	52.1	31	5 256	24.5	4 783	2 179
10.1	0.3	199.9	52.2	31	3 828	27.4	3 400	1 760
10.1	0.1	145.9	51.8	29	2 815	29.0	2 463	1 363
20.0	10	239.9	56.4	26	4 251	27.9	3 757	1 959
20.0	3	179.7	62.3	26	2 836	32.1	2 404	1 509
20.0	1	154.5	52.5	23	1 990	34.7	1 637	1 131
20.0	0.3	67.8	51.9	19	1 303	37.2	1 036	766
20.0	0.1	45.5	51.7	14	879	38.2	691	544
30.0	10	66.4	50.8	16	1 706	38.7	1 331	1 067
30.0	3	46.8	47.7	15	1 024	42.0	781	665
30.0	1	33.8	52.8	12	639	44.5	458	448
30.0	0.3	20.1	52.0	11	366	42.4	285	260
39.9	0.1	13.0	51.8	11	251	48.6	198	186
39.9	10	38.3	66.7	14	267	45.1	421	423
39.9	3	16.9	47.8	13	353	43.6	258	243
39.9	1	11.9	50.9	14	233	41.0	178	153
39.9	0.3	6.1	52.0	17	156	38.8	125	94

Éprouvette : ED-074-15		Densité brute : 2.366						
Densité max : 2.445		Teneur vides : 3.2%						
T	f	σ	ϵ	CV_e	β	θ	E^*	E_2
(°C)	(Hz)	(kPa)	($\mu\epsilon$)	(%)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
-19.6	10	602.2	32.2	9	27 372	3.5	27 323	1 651
-19.6	3	763.6	29.8	11	25 020	4.4	25 543	1 978
-19.6	1	703.2	29.1	10	24 144	4.9	24 055	2 065
-19.6	0.3	677.9	30.2	11	22 403	6.1	22 306	2 392
-9.7	10	936.7	44.2	7	21 255	6.8	21 107	2 503
-9.7	3	775.7	40.3	9	19 240	8.4	19 035	2 802
-9.7	1	665.6	39.4	11	17 367	8.7	17 159	2 822
-9.7	0.3	624.8	40.4	13	15 449	9.5	15 238	2 543
-9.7	0.1	563.9	41.2	18	13 064	12.8	13 344	2 034
0.3	10	696.7	47.6	13	14 677	10.8	14 418	2 780
0.3	3	609.4	50.0	13	12 196	14.8	11 807	3 065
0.3	1	506.6	49.7	14	10 240	15.2	9 881	2 688
0.3	0.3	430.3	51.2	18	8 395	17.3	8 014	2 501
0.3	0.1	347.7	51.4	18	6 783	19.6	6 370	2 271
10.1	10	456.8	53.1	14	8 829	18.6	8 180	2 748
10.1	3	367.2	56.6	18	6 487	21.7	6 026	2 400
10.1	1	260.3	51.9	20	5 013	24.7	4 555	2 094
10.1	0.3	169.3	52.3	21	3 822	27.6	3 210	1 677
10.1	0.1	137.5	51.9	20	2 850	29.9	2 298	1 321
19.9	10	190.3	50.9	23	3 738	31.3	3 192	1 942
19.9	3	149.2	62.8	20	2 375	35.4	1 935	1 377
19.9	1	84.0	52.6	18	1 599	36.4	1 253	960
19.9	0.3	52.1	51.9	12	1 003	36.5	774	636
19.9	0.1	33.7	52.1	8	647	36.2	501	406
30.1	10	71.3	49.6	12	1 439	40.5	1 094	935
30.1	3	44.4	52.2	9	851	40.5	628	574
30.1	1	28.4	52.2	8	545	40.1	404	385
30.1	0.3	17.7	52.0	9	340	40.3	280	220
30.0	0.1	12.3	51.5	11	237	35.7	180	136
40.0	10	41.4	51.4	4	452	46.6	293	345
40.0	3	12.8	48.8	3	260	50.1	167	200
40.0	1	7.9	49.7	3	159	41.2	120	105
40.0	0.1	4.1	51.7	4	80	32.7	67	43

Éprouvette : ED-075-15		Densité brute : 2.363						
Densité max : 2.445		Teneur vides : 3.8%						
T	f	σ	ϵ	CV_e	β	θ	E^*	E_2
(°C)	(Hz)	(kPa)	($\mu\epsilon$)	(%)	(MPa)	(°)	(MPa)	(MPa)
-19.6	10	663.1	33.3	30	25 953	4.3	25 903	1 902
-19.6	3	729.6	29.9	31	24 428	4.7	24 344	1 996
-19.6	1	675.3	29.2	30	23 134	5.2	23 040	2 082
-19.6	0.3	653.2	30.3	29	21 574	5.7	21 469	2 126
-19.6	0.1	623.5	31.0	28	20 133	5.1	20 052	1 806
-9.8	10	894.9	45.4	32	19 718	6.8	19 568	2 255
-9.8	3	727.2	40.7	31	17 890	8.0	17 715	2 493
-9.8	1	642.3	39.4	29	16 305	8.7	16 119	2 459
-9.8	0.3	585.0	40.1	25	14 588	9.6	14 385	2 421
-9.8	0.1	535.5	41.3	22	12 873	11.3	12 723	2 530
0.3	10	690.2	49.2	15	14 031	10.3	13 803	2 520
0.3	3	605.6	50.6	18	11 958	12.5	11 674	2 587
0.3	1	510.2	49.7	21	10 371	13.8	9 978	2 447
0.3	0.3	435.9	51.3	25	8 492	15.8	8 170	2 319
0.3	0.1	361.3	51.7	28	6 968	18.1	6 641	2 176
10.3	10	442.0	53.0	25	6 332	18.1	5 918	2 584
10.3	3	346.9	54.3	27	6 390	20.9	5 969	2 261
10.3	1	255.6	51.7	28	4 941	24.1	4 510	2 019
10.3	0.3	187.8	52.1	29	3 608	27.4	3 204	1 658
10.3	0.1	136.7	51.6	28	2 649	25.8	2 386	1 151
20.2	10	225.1	52.9	19	4 257	27.8	3 764	1 969
20.2	3	186.9	58.6	20	2 851	32.4	2 408	1 526
20.2	1	103.1	52.3	18	1 972	35.4	1 607	1 143
20.2	0.3	65.8	51.9	17	1 268	37.5	1 006	773
20.2	0.1	43.3	51.8	13	835	39.3	648	526
30.4	10	79.8	52.2	16	1 520	39.6	1 178	974
30.4	3	43.3	47.0	14	921	41.4	691	610
30.4	1	30.4	52.1	13	583	43.0	426	396
30.3	0.3	19.4	52.1	13	373	42.3	276	251
30.3	0.1	13.2	52.0	14	254	38.9	196	159
39.9	10	26.5	48.2	10	591	45.5	414	421
39.9	3	19.2	55.5	9	348	47.8	233	257
39.8	1	11.2	50.9	8	219	37.9	173	135
39.8	0.3	7.3	51.9	8	140	48.4	97	101
40.0	0.1	5.0	52.1	7	95	35.1	78	55

Section 3-GB20 (200 mm) au SERUL

Transports Québec Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec G1P3W8	RAPPORTS D'ESSAIS - ENROBÉS ESSAIS EN TRACTION-COMPRESSION DIRECTE	Page : 1 de 2																														
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> ÉCHANTILLON Mode d'échantillonnage : Carottes Type d'échantillon : Carottes de 150 mm de diamètre Type d'enrobé : GB-20 Usage : Couche de base Date de réception : </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Soumis par : Jean-Pascal Blodreau, UL Destinataire : Fritz Prophète, SC Numéro de dossier interne : AM-050-14 </td> </tr> </table>			ÉCHANTILLON Mode d'échantillonnage : Carottes Type d'échantillon : Carottes de 150 mm de diamètre Type d'enrobé : GB-20 Usage : Couche de base Date de réception :	EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Soumis par : Jean-Pascal Blodreau, UL Destinataire : Fritz Prophète, SC Numéro de dossier interne : AM-050-14																												
ÉCHANTILLON Mode d'échantillonnage : Carottes Type d'échantillon : Carottes de 150 mm de diamètre Type d'enrobé : GB-20 Usage : Couche de base Date de réception :	EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Soumis par : Jean-Pascal Blodreau, UL Destinataire : Fritz Prophète, SC Numéro de dossier interne : AM-050-14																															
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761241 - 761242 - 761243 Numéro d'échantillon : C-6 - C-7 - C-8 Prélevé par : Steeve Gagnon, MTQ Date/Heure : 2014-10-09 00:00 Lieu : Sur la route Source de l'enrobé : Source de bitume : Lot : </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Entrepreneur : Route/tronç./sect. : Planche d'essai SERUL - Sect. 3 Châssage/décalage : Voie/emplacement dans la voie : Municipalité : Les-Jacques-Cartier Source de granulats : Classe de bitume : PG 58-34 </td> </tr> </table>			PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761241 - 761242 - 761243 Numéro d'échantillon : C-6 - C-7 - C-8 Prélevé par : Steeve Gagnon, MTQ Date/Heure : 2014-10-09 00:00 Lieu : Sur la route Source de l'enrobé : Source de bitume : Lot :	Entrepreneur : Route/tronç./sect. : Planche d'essai SERUL - Sect. 3 Châssage/décalage : Voie/emplacement dans la voie : Municipalité : Les-Jacques-Cartier Source de granulats : Classe de bitume : PG 58-34																												
PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761241 - 761242 - 761243 Numéro d'échantillon : C-6 - C-7 - C-8 Prélevé par : Steeve Gagnon, MTQ Date/Heure : 2014-10-09 00:00 Lieu : Sur la route Source de l'enrobé : Source de bitume : Lot :	Entrepreneur : Route/tronç./sect. : Planche d'essai SERUL - Sect. 3 Châssage/décalage : Voie/emplacement dans la voie : Municipalité : Les-Jacques-Cartier Source de granulats : Classe de bitume : PG 58-34																															
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Centrale d'enrobage : 130 - Inter-Cité Construction Type d'essai à réaliser : Module complexe Remarque : Carottes C-6, C-7 et C-8 de la Section 3 Couche de base </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Formule d'enrobé : 07-608 Teneur en bitume : 4.50% </td> </tr> </table>			Centrale d'enrobage : 130 - Inter-Cité Construction Type d'essai à réaliser : Module complexe Remarque : Carottes C-6, C-7 et C-8 de la Section 3 Couche de base	Formule d'enrobé : 07-608 Teneur en bitume : 4.50%																												
Centrale d'enrobage : 130 - Inter-Cité Construction Type d'essai à réaliser : Module complexe Remarque : Carottes C-6, C-7 et C-8 de la Section 3 Couche de base	Formule d'enrobé : 07-608 Teneur en bitume : 4.50%																															
LC 28-700 Détermination du module complexe des enrobés <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Mode de préparation : Carottage sur la route Hauteur des éprouvettes : 135 mm Diamètre des éprouvettes : 75 mm </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left;">Éprouvette :</td> <td>EB-078-15</td> <td>EB-079-15</td> <td>EB-080-15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dmax :</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dbrute :</td> <td>2.348</td> <td>2.317</td> <td>2.323</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">% de vides :</td> <td>5.1%</td> <td>6.3%</td> <td>6.1%</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>			Mode de préparation : Carottage sur la route Hauteur des éprouvettes : 135 mm Diamètre des éprouvettes : 75 mm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left;">Éprouvette :</td> <td>EB-078-15</td> <td>EB-079-15</td> <td>EB-080-15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dmax :</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dbrute :</td> <td>2.348</td> <td>2.317</td> <td>2.323</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">% de vides :</td> <td>5.1%</td> <td>6.3%</td> <td>6.1%</td> </tr> </table>	Éprouvette :	EB-078-15	EB-079-15	EB-080-15	Dmax :	2.473	2.473	2.473	Dbrute :	2.348	2.317	2.323	% de vides :	5.1%	6.3%	6.1%												
Mode de préparation : Carottage sur la route Hauteur des éprouvettes : 135 mm Diamètre des éprouvettes : 75 mm	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left;">Éprouvette :</td> <td>EB-078-15</td> <td>EB-079-15</td> <td>EB-080-15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dmax :</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> <td>2.473</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dbrute :</td> <td>2.348</td> <td>2.317</td> <td>2.323</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">% de vides :</td> <td>5.1%</td> <td>6.3%</td> <td>6.1%</td> </tr> </table>	Éprouvette :	EB-078-15	EB-079-15	EB-080-15	Dmax :	2.473	2.473	2.473	Dbrute :	2.348	2.317	2.323	% de vides :	5.1%	6.3%	6.1%															
Éprouvette :	EB-078-15	EB-079-15	EB-080-15																													
Dmax :	2.473	2.473	2.473																													
Dbrute :	2.348	2.317	2.323																													
% de vides :	5.1%	6.3%	6.1%																													
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>E_u</td> <td>E_u</td> <td>δ</td> <td>k</td> <td>h</td> <td>τ_u</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>30 300</td> <td>2.893</td> <td>0.174</td> <td>0.549</td> <td>0.218</td> <td>-0.152</td> <td>7.93E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>δ</td> <td>α</td> <td>β</td> <td>γ</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>-0.543</td> <td>4.983</td> <td>-1.934</td> <td>-0.395</td> <td>-0.144</td> <td>3.61E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C Remarque : </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top; text-align: center;"> Courbe maîtresse de module dynamique selon Witczak à 10 Hz  </td> </tr> </table>			MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>E_u</td> <td>E_u</td> <td>δ</td> <td>k</td> <td>h</td> <td>τ_u</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>30 300</td> <td>2.893</td> <td>0.174</td> <td>0.549</td> <td>0.218</td> <td>-0.152</td> <td>7.93E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>δ</td> <td>α</td> <td>β</td> <td>γ</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>-0.543</td> <td>4.983</td> <td>-1.934</td> <td>-0.395</td> <td>-0.144</td> <td>3.61E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C Remarque :	E _u	E _u	δ	k	h	τ _u	θ ₁	θ ₂	0.1	30 300	2.893	0.174	0.549	0.218	-0.152	7.93E-04	δ	α	β	γ	θ ₁	θ ₂	-0.543	4.983	-1.934	-0.395	-0.144	3.61E-04	Courbe maîtresse de module dynamique selon Witczak à 10 Hz 
MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>E_u</td> <td>E_u</td> <td>δ</td> <td>k</td> <td>h</td> <td>τ_u</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>30 300</td> <td>2.893</td> <td>0.174</td> <td>0.549</td> <td>0.218</td> <td>-0.152</td> <td>7.93E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG E* (MPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>δ</td> <td>α</td> <td>β</td> <td>γ</td> <td>θ₁</td> <td>θ₂</td> </tr> <tr> <td>-0.543</td> <td>4.983</td> <td>-1.934</td> <td>-0.395</td> <td>-0.144</td> <td>3.61E-04</td> </tr> </table> * À la température de référence (T) = 10°C Remarque :	E _u	E _u	δ	k	h	τ _u	θ ₁	θ ₂	0.1	30 300	2.893	0.174	0.549	0.218	-0.152	7.93E-04	δ	α	β	γ	θ ₁	θ ₂	-0.543	4.983	-1.934	-0.395	-0.144	3.61E-04	Courbe maîtresse de module dynamique selon Witczak à 10 Hz 			
E _u	E _u	δ	k	h	τ _u	θ ₁	θ ₂																									
0.1	30 300	2.893	0.174	0.549	0.218	-0.152	7.93E-04																									
δ	α	β	γ	θ ₁	θ ₂																											
-0.543	4.983	-1.934	-0.395	-0.144	3.61E-04																											
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 40%;">Essais supervisés par :</td> <td style="width: 30%; text-align: center;">Christian Lerocelle, tech.</td> <td style="width: 30%; text-align: right;">Date : 2015-08-26</td> </tr> </table>			Essais supervisés par :	Christian Lerocelle, tech.	Date : 2015-08-26																											
Essais supervisés par :	Christian Lerocelle, tech.	Date : 2015-08-26																														
COMMENTAIRES DE L'APPROBATEUR Original du rapport signé par : <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 40%;">Vérifié par :</td> <td style="width: 30%; text-align: center;">Maxime Laplante-Bolin, ing. jr</td> <td style="width: 30%; text-align: right;">Date : 2015-08-27</td> </tr> </table>			Vérifié par :	Maxime Laplante-Bolin, ing. jr	Date : 2015-08-27																											
Vérifié par :	Maxime Laplante-Bolin, ing. jr	Date : 2015-08-27																														

MODÈLE HUET-GAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E^* (MPa)

$$E^* = E_s + \frac{E_c - E_s}{1 + \delta(\omega\tau)^a + (\omega\tau)^b}$$

$$\tau = a_T \cdot \tau_s$$

$$\log a_T = a_1 (T - T_s) + a_2 (T - T_s)^2$$

E_s	E_c	δ	k	h	τ_s	a_1	a_2
0.1	30 300	2.993	0.174	0.549	0.219	-0.152	7.90E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, $\log |E^*|$ (MPa)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1 (T - T_s) + a_2 (T - T_s)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
-0.543	4.983	-1.934	-0.395	-0.144	3.81E-04

Éprouvette : ED-079-15 Densité brute : 2.348

Densité max : 2.473 Teneur vides : 5.1%

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV_ϵ (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.6	10	702.8	30.8	29	22 967	2.8	22 909	1 137
-19.6	3	645.3	29.8	29	21 777	2.8	21 755	979
-19.6	1	606.3	29.0	29	20 910	4.2	20 853	1 539
-19.6	0.3	582.7	29.8	27	19 865	6.4	19 741	2 214
-4.7	10	754.8	41.6	36	19 158	5.3	19 076	1 771
-4.7	3	700.0	39.7	36	17 648	6.5	17 531	2 009
-4.7	1	642.7	39.4	37	16 267	7.4	16 161	2 087
-4.7	0.3	596.4	40.2	37	14 839	8.5	14 675	2 202
-4.7	0.1	550.8	41.0	37	13 437	7.9	13 310	1 840
0.3	10	754.2	51.7	26	14 194	7.9	14 059	1 952
0.3	3	614.4	49.2	27	12 499	10.4	12 262	2 287
0.3	1	528.4	47.8	27	11 050	11.9	10 813	2 275
0.3	0.3	479.1	50.4	26	9 509	13.2	9 259	2 185
0.3	0.1	415.5	51.4	26	8 077	15.0	7 801	2 094
10.1	10	417.4	43.0	15	9 708	14.2	9 412	2 380
10.1	3	382.2	50.1	15	7 833	17.3	7 478	2 332
10.1	1	317.3	49.9	16	6 354	19.5	5 990	2 119
10.0	0.3	251.9	51.2	16	4 922	22.3	4 553	1 886
10.1	0.1	180.8	51.8	16	3 752	25.3	3 363	1 602
20.1	10	282.1	49.7	15	5 276	23.9	4 825	2 135
20.1	3	171.7	45.5	15	3 773	27.9	3 336	1 783
20.1	1	139.2	52.2	15	2 668	32.4	2 253	1 429
20.1	0.3	92.3	52.0	14	1 776	38.0	1 436	1 045
20.1	0.1	81.5	51.8	12	1 191	39.3	801	755
29.8	10	119.6	53.8	13	2 233	38.8	1 787	1 339
29.8	3	64.8	48.3	11	1 395	40.8	1 058	911
29.9	1	45.9	53.4	10	859	44.1	617	587
29.9	0.3	26.3	52.5	7	501	48.0	348	360
30.1	0.1	16.0	52.1	5	307	48.8	211	223
40.2	10	30.8	42.0	10	754	48.2	489	547
40.3	3	20.0	51.1	9	391	50.3	250	301
40.3	1	11.9	53.4	10	223	49.8	144	170
40.4	0.3	6.7	52.0	11	129	48.7	89	94
40.4	0.1	4.6	51.9	13	89	47.4	60	65

Éprouvette : ED-079-15 Densité brute : 2.317

Densité max : 2.473 Teneur vides : 6.3%

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV_ϵ (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.7	10	732.3	29.6	17	24 771	2.7	24 744	1 180
-19.7	3	691.8	29.3	17	23 006	2.8	23 578	1 180
-19.7	1	650.5	28.9	17	22 500	4.3	22 436	1 891
-19.7	0.3	634.7	29.8	17	21 270	4.5	21 205	1 888
-9.8	10	827.8	40.3	8	20 517	5.7	20 418	2 031
-9.8	3	747.7	39.5	8	18 916	6.3	18 802	2 070
-9.8	1	684.3	39.4	8	17 385	6.9	17 258	2 096
-9.8	0.3	631.4	40.1	7	15 727	8.2	15 588	2 230
-9.8	0.1	583.1	41.1	7	14 191	8.4	14 040	2 088
0.4	10	759.5	51.2	13	14 826	9.4	14 625	2 433
0.4	3	633.5	48.9	13	12 966	11.2	12 710	2 515
0.4	1	540.1	47.5	12	11 373	12.2	11 114	2 412
0.4	0.3	491.8	50.7	11	9 701	13.6	9 430	2 277
0.4	0.1	423.3	51.3	10	8 244	15.9	7 930	2 257
10.1	10	483.2	44.8	8	10 116	13.9	9 819	2 430
10.1	3	409.7	50.2	8	8 159	16.9	7 806	2 376
10.1	1	330.2	49.8	8	6 856	19.4	6 277	2 213
10.1	0.3	264.2	51.3	9	5 153	21.8	4 704	1 915
10.1	0.1	203.7	51.6	11	3 948	24.4	3 593	1 830
20.2	10	258.3	45.8	11	5 834	22.7	5 197	2 178
20.2	3	174.3	42.9	12	4 061	27.6	3 599	1 881
20.2	1	149.8	51.9	14	2 884	30.9	2 475	1 482
20.2	0.3	100.2	51.9	18	1 932	34.4	1 594	1 093
20.2	0.1	87.2	51.5	18	1 305	37.7	1 032	796
30.0	10	122.7	52.3	9	2 344	35.8	1 902	1 370
30.0	3	86.7	45.8	11	1 484	39.1	1 136	924
30.1	1	48.1	52.9	11	908	42.3	672	612
30.1	0.3	28.3	52.4	12	540	44.8	383	380
30.2	0.1	17.7	52.0	18	340	43.4	247	233
39.7	10	42.4	49.9	9	850	46.2	598	613
39.7	3	27.7	60.1	9	481	47.7	310	341
39.7	1	14.8	53.8	11	273	47.4	185	201
39.8	0.3	8.3	52.0	13	160	45.9	111	115
40.1	0.1	5.1	52.1	15	99	41.8	74	66

Éprouvette : ED-080-15 Densité brute : 2.323

Densité max : 2.473 Teneur vides : 6.1%

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV_ϵ (%)	E^* (MPa)	δ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19.8	10	721.9	30.4	27	23 739	3.2	23 703	1 316
-19.8	3	688.1	29.5	26	22 627	3.7	22 581	1 447
-19.7	1	628.1	29.1	27	21 585	4.7	21 513	1 764
-19.7	0.3	611.0	30.0	27	20 353	5.0	20 276	1 770
-19.7	0.1	588.5	30.8	27	19 237	5.2	19 157	1 747
-4.7	10	783.8	40.9	30	19 185	5.7	19 071	1 904
-4.7	3	699.2	39.7	29	17 592	6.8	17 470	2 088
-4.7	1	642.4	39.7	29	16 195	7.5	16 058	2 107
-4.7	0.3	580.8	40.5	27	14 885	8.5	14 505	2 182
-4.7	0.1	543.7	40.9	26	13 288	8.1	13 157	1 886
0.4	10	728.1	52.1	20	13 984	9.3	13 790	2 271
0.4	3	601.6	49.3	27	12 197	11.2	11 963	2 379
0.4	1	514.3	48.1	27	10 703	11.8	10 476	2 183
0.4	0.3	459.8	50.8	26	9 090	13.8	8 828	2 187
0.4	0.1	398.3	51.2	25	7 739	15.7	7 450	2 094
10.1	10	443.1	48.8	17	9 554	14.8	9 189	2 429
10.1	3	385.7	50.5	17	7 640	17.3	7 296	2 286
10.1	1	308.3	49.9	16	6 190	19.8	5 831	2 102
10.1	0.3	245.3	51.3	16	4 700	22.8	4 415	1 834
10.1	0.1	188.5	51.8	16	3 642	25.1	3 296	1 545
20.1	10	354.3	50.3	17	5 080	24.5	4 602	2 102
20.1	3	154.0	42.3	18	3 642	27.7	3 224	1 693
20.1	1	133.1	51.8	19	2 587	31.7	2 185	1 347
20.1	0.3	88.8	51.8	18	1 711	35.4	1 395	982
20.1	0.1	59.2	51.5	17	1 149	37.8	910	700
30.4	10	111.1	53.3	17	2 082	38.0	1 684	1 225
30.4	3	83.1	48.8	16	1 291	39.2	1 001	816
30.4	1	43.2	53.1	15	812	42.3	601	548
30.3	0.3	25.7	52.5	16	489	43.3	358	336
30.3	0.1	16.3	51.9	19	313	48.0	218	226
39.8	10	40.3	65.0	15	713	48.0	477	529
39.8	3	18.9	48.2	12	382	50.8	247	304
39.8	1	11.7	54.8	10	215	51.0	135	187
39.8	0.3	6.0	52.1	9	115	54.4	67	94
39.8	0.1	3.5	51.8	10	88	45.1	40	48

Annexe B: Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe dans la fosse d'essai du laboratoire de géotechnique de l'Université Laval

Projet : AM-C55-14

Cliant : Jean-Pascal Rièdeau, Chaire GC

Type enrobé : EE-10C

Teneur bitume : 5,3%

Source granulats :

Source enrobé :

Carottes Curve GC

Type bitume : PG 58-28

Teneur vides : 3,2%

Source bitume :

Ajout :

MODÈLE HUIET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E^* (MPa)

$$E^* = E_s + \frac{E_m - E_s}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-\alpha} + (i\omega\tau)^{-\beta}}$$

$$\tau = a_T \cdot \tau_0$$

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

$T = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
RMSE log E = 0,100
RMSE log E2 = 0,062
R ² log E = 0,99
R ² log E2 = 0,99
n = 64

E_s	E_m	δ	k	n	τ_0	a_1	a_2
17,5	36 500	2,065	0,189	0,532	0,004	-0,135	9,29E-04

MODÈLE WITZAK DE MODULE DYNAMIQUE, $\log |E^*|$ (MPa)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

$T_r = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
RMSE log $ E^* $ = 0,059
R ² log $ E^* $ = 0,99
n = 64
$E_{s,0}$ = 21,1
$E_{s,\infty}$ = 26 700

δ	α	β	γ	a_1	a_2
1,325	3,102	-0,849	-0,569	-0,145	1,19E-03

Echantillon : EE-033-14

Densité brute : 2,394

Teneur vides : 3,2%

Densité max : 2,462

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (%)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,3	10	882,8	32,7	16	26 963	6,8	26 763	3 190
-19,3	3	748,1	29,8	17	25 075	6,4	24 919	2 794
-19,3	1	684,0	29,2	16	23 432	6,0	23 303	2 463
-19,3	0,3	646,8	30,0	16	21 591	6,7	21 442	2 529
-19,4	0,1	610,3	30,8	16	19 790	6,8	19 653	2 329
-9,1	10	921,5	43,9	16	21 012	10,7	20 644	3 916
-9,1	3	749,9	40,2	17	18 051	10,5	18 336	3 414
-9,1	1	651,0	39,4	17	16 538	10,9	16 242	3 117
-9,1	0,3	574,2	40,4	15	14 203	12,8	13 852	3 136
-9,0	0,1	496,5	41,1	15	12 130	15,3	11 700	3 199
1,3	10	636,0	48,3	13	12 597	17,8	11 967	3 842
1,3	3	529,4	52,7	13	10 065	19,4	9 485	3 336
1,3	1	406,5	51,0	11	7 976	22,0	7 396	2 987
1,3	0,3	306,6	51,6	10	5 943	25,2	5 379	2 527
1,3	0,1	225,3	51,7	8	4 357	27,2	3 677	1 969
11,1	10	335,0	53,2	11	6 316	28,7	5 540	3 034
11,1	3	253,7	59,2	10	4 288	32,8	3 605	2 324
11,1	1	155,0	52,9	8	2 931	35,6	2 384	1 706
11,1	0,3	94,9	52,2	6	1 816	36,3	1 404	1 152
11,1	0,1	58,7	51,6	5	1 134	42,5	837	765
20,2	10	119,9	48,6	5	2 467	41,4	1 851	1 630
20,3	1	44,4	52,3	1	848	44,1	609	561
20,3	0,3	24,9	51,7	2	481	46,2	333	348
29,6	10	44,8	46,6	1	563	44,7	685	577
29,6	3	33,0	61,5	2	535	40,8	405	350
29,6	1	19,0	52,7	2	360	35,7	292	210
29,6	0,3	12,7	52,6	2	242	32,2	204	129
29,7	0,1	9,3	52,0	1	179	25,6	156	86
39,9	10	20,4	52,6	7	385	40,9	292	253
39,9	3	13,5	51,6	6	262	25,6	228	130
39,9	1	11,0	50,1	6	219	15,6	205	79

Echantillon : EE-035-14

Densité brute : 2,392

Teneur vides : 3,2%

Densité max : 2,462

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (%)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-10,6	10	859,7	33,0	23	25 038	7,3	25 029	3 291
-10,6	3	730,2	30,1	24	24 264	6,1	24 125	2 594
-10,6	1	666,4	29,5	23	22 628	6,0	22 504	2 368
-10,6	0,3	621,4	30,0	23	20 735	7,3	20 557	2 631
-10,6	0,1	583,1	30,6	23	19 053	8,5	18 845	2 809
-6,4	10	884,5	44,2	15	19 998	11,0	19 632	3 808
-6,4	3	710,4	40,2	16	17 659	10,9	17 342	3 331
-6,4	1	614,2	39,3	16	15 618	11,1	15 325	3 014
-6,4	0,3	540,6	40,5	16	13 362	13,2	13 010	3 048
-6,4	0,1	465,3	41,2	15	11 298	15,6	10 875	3 023
0,9	10	602,0	48,4	4	12 450	17,6	11 898	3 761
0,9	3	528,0	52,9	5	9 973	19,0	9 431	3 244
0,9	1	408,4	51,0	4	7 963	21,2	7 426	2 875
0,9	0,3	308,4	51,5	4	5 694	24,6	5 454	2 487
0,9	0,1	229,9	51,7	3	4 444	27,9	3 826	2 081
11,2	10	319,9	52,5	7	6 693	29,5	5 302	3 003
11,2	3	245,2	59,4	6	4 129	31,9	3 504	2 184
11,2	1	146,6	52,7	4	2 819	35,7	2 290	1 644
11,2	0,3	92,1	52,1	3	1 766	39,5	1 362	1 123
11,2	0,1	57,6	51,8	2	1 113	41,3	835	735
20,1	10	125,0	50,9	6	2 457	41,4	1 843	1 625
20,1	1	44,9	52,2	2	859	45,9	597	617
20,1	0,3	25,6	51,7	3	496	44,0	357	344
20,1	0,1	15,8	51,5	5	306	45,5	214	218
29,5	10	45,2	61,1	4	740	52,4	451	587
29,5	3	26,5	67,9	5	390	50,3	249	300
29,5	1	12,2	53,0	5	231	45,8	161	166
29,5	0,3	7,2	52,1	4	139	44,1	100	97
29,5	0,1	4,7	51,5	5	90	44,0	65	63
38,5	10	14,9	47,2	1	316	48,4	210	237
38,5	3	10,6	57,1	2	186	40,9	141	122
38,5	1	7,2	52,8	3	136	37,1	108	82
38,5	0,3	5,4	52,3	5	109	20,0	96	35

Note : Enrobé de surface

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.

Emmanuel F. Chénard Stagiaire

Supervisé par : Maxime Laporte-Gervin, ing. jr.

Vérifié par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.

Date : 10 juillet 2014

Date : 11 juillet 2014

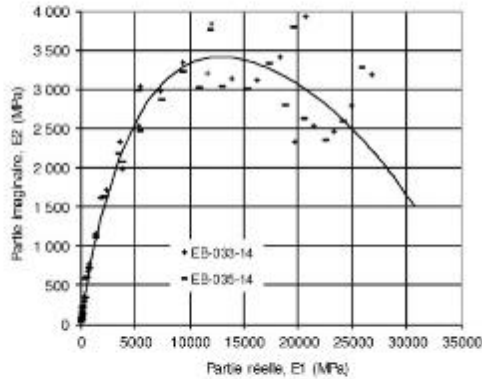
Date : 11 juillet 2014

Projet : AM-055-14 Type enrobé : EB-10C
Client : Jean-Pascal Blodreau, Chaire ISC Type bitume : PG 58-28

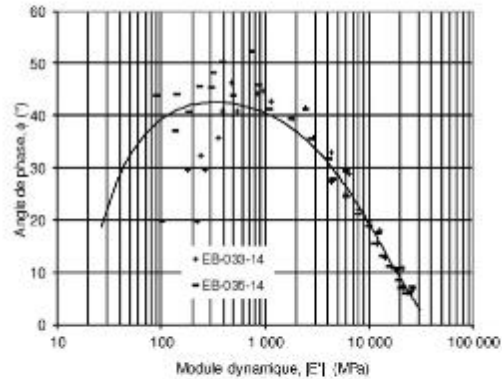
Note : Enrobé de surface

Teneur bitume : 5,3% Source enrobé : Carottes Cuve ISC
Teneur vides : 3,2% Ajout :

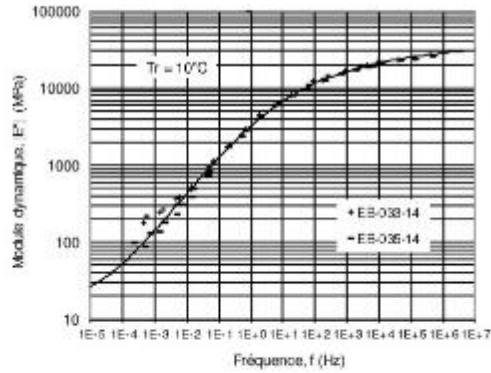
Module complexe dans le plan Cole et Cole



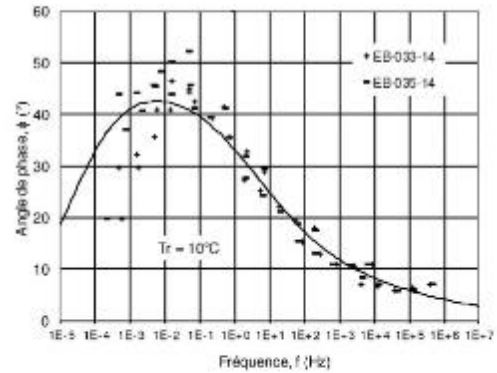
Module complexe dans l'espace de Black



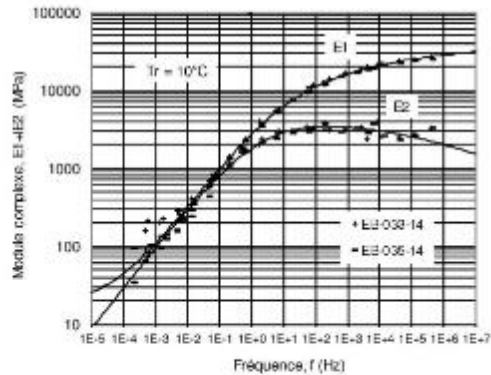
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



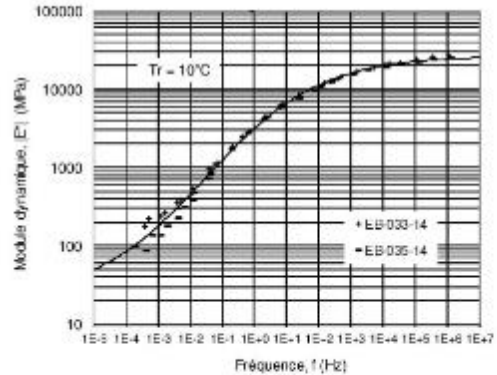
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Projet : AM-055-14

Client : Jean-Pascal Blodreau, Chaire BC

Type enrobé : EB-10C

Teneur bitume : 5,3%

Source granulats :

Source enrobé :

Carottes Cuve I3C

Type brume : PG 58-28

Teneur vides : 3,4%

Source bitume :

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E^* (MPa)

$$E^* = E_o + \frac{E_\infty - E_o}{1 + \delta(\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

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

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E1 = 0,084
RMSE log E2 = 0,070
R ² log E1 = 0,99
R ² log E2 = 0,99
n = 67

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
62,9	36 700	2,449	0,195	0,567	0,006	-0,137	1,16E-03

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, $\log |E^*|$ (MPa)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log $ E^* $ = 0,053
R ² log $ E^* $ = 1,00
n = 67
E_{max} = 52,5
E_{avg} = 24 600

δ	α	β	γ	a_1	a_2
1,720	2,671	-0,725	-0,633	-0,148	1,10E-03

Échantillon : EB-034-14

Densité brute : 2,377

Teneur vides : 3,5%

Densité max : 2,462

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-18,6	10	866,7	32,8	11	25 418	7,2	26 208	3 322
-18,6	3	736,1	29,9	12	24 604	6,4	24 450	2 745
-18,6	1	673,3	29,2	12	23 049	6,0	22 921	2 419
-18,6	0,3	632,5	29,9	12	21 167	7,0	21 010	2 571
-18,6	0,1	595,0	30,8	12	19 343	8,1	19 152	2 712
-8,2	10	886,4	44,4	10	19 943	10,9	19 586	3 758
-8,2	3	712,5	40,5	10	17 580	10,4	17 291	3 175
-8,2	1	614,7	39,6	10	15 540	11,8	15 214	3 167
-8,2	0,3	538,3	40,5	10	13 290	13,3	12 935	3 054
-8,2	0,1	464,6	41,3	10	11 258	15,5	10 850	3 002
1,3	10	629,8	50,2	17	12 554	18,1	11 930	3 910
1,3	3	524,3	52,3	16	10 033	19,2	9 473	3 306
1,3	1	407,9	51,0	15	8 001	21,5	7 445	2 929
1,3	0,3	311,5	51,7	13	6 029	24,6	5 490	2 514
1,3	0,1	231,6	51,6	11	4 485	27,7	3 971	2 085
11,1	10	330,0	53,0	15	5 226	29,6	5 414	3 074
11,2	3	250,1	59,2	12	4 224	32,1	3 578	2 246
11,2	1	152,8	52,8	9	2 991	36,3	2 330	1 712
11,2	0,3	95,4	52,2	6	1 827	38,4	1 432	1 135
11,2	0,1	61,2	51,6	5	1 186	38,9	923	745
20,3	10	126,9	51,3	4	2 473	41,5	1 852	1 639
20,3	1	46,2	52,4	2	881	43,7	637	609
20,3	0,3	26,9	51,8	4	520	42,7	382	353
20,3	0,1	17,3	51,3	6	337	43,0	247	230
29,9	10	36,0	47,4	5	760	52,5	463	603
29,8	3	26,9	67,1	5	400	49,6	260	305
29,8	1	12,8	52,5	5	244	46,5	168	177
29,8	0,3	8,4	52,5	6	160	40,7	122	105
29,9	0,1	5,7	51,5	7	111	34,7	91	63
39,1	10	21,4	55,4	3	387	40,6	293	252
39,1	3	13,5	51,1	2	264	33,0	222	144
39,1	1	10,5	50,8	2	206	23,7	189	83
39,0	0,3	8,4	52,4	1	161	20,0	151	55
39,1	0,1	6,7	52,0	3	129	17,4	123	39

Échantillon : EB-036-14

Densité brute : 2,381

Teneur vides : 3,3%

Densité max : 2,462

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-18,5	10	869,5	33,0	24	26 337	7,1	26 136	3 252
-18,5	3	736,1	30,2	23	24 406	5,7	24 285	2 435
-18,5	1	673,1	29,4	23	22 895	6,3	22 758	2 500
-18,5	0,3	630,6	30,0	22	21 043	6,9	20 890	2 527
-18,5	0,1	597,6	30,7	24	18 464	8,1	18 268	2 757
-8,6	10	881,3	43,9	24	20 090	10,6	19 750	3 685
-8,6	3	723,3	40,7	25	17 771	10,4	17 461	3 195
-8,6	1	625,7	39,6	24	15 802	11,8	15 471	3 218
-8,6	0,3	549,4	40,4	22	13 595	12,6	13 267	2 970
-8,6	0,1	481,8	41,4	21	11 641	14,5	11 272	2 909
0,9	10	636,8	48,9	15	13 029	17,3	12 438	3 882
0,9	3	555,5	52,6	15	10 568	17,4	10 086	3 159
0,9	1	434,5	50,8	14	8 559	20,0	8 045	2 920
0,9	0,3	338,6	51,5	12	6 580	23,0	6 056	2 574
0,9	0,1	260,1	52,0	10	5 007	25,6	4 516	2 163
11,2	10	342,3	52,8	10	6 483	27,8	5 796	3 021
11,2	3	267,6	59,6	8	4 467	31,1	3 842	2 318
11,2	1	165,4	52,7	6	3 138	33,5	2 618	1 731
11,2	0,3	106,4	52,2	4	2 036	36,9	1 629	1 222
11,2	0,1	69,6	51,7	5	1 347	37,8	1 064	826
19,8	10	132,9	49,7	3	2 674	40,2	2 043	1 725
19,8	1	52,8	52,2	3	1 012	42,0	752	676
19,8	0,3	32,2	51,7	5	624	41,5	467	413
19,8	0,1	21,1	51,7	8	409	35,5	333	237
29,7	10	42,8	50,3	4	851	50,6	540	657
29,7	3	29,5	65,4	4	451	49,3	294	342
29,7	1	14,5	52,8	5	275	53,2	165	220
29,7	0,3	8,8	52,0	6	169	44,8	120	119
37,5	10	25,3	58,8	7	431	44,7	306	303
37,5	3	14,6	51,6	7	280	35,1	231	163
37,5	1	10,8	51,9	8	209	29,7	181	103
37,5	0,3	8,1	51,9	8	156	27,0	139	71
37,5	0,1	6,5	51,9	8	125	20,5	117	44

Note : Enrobé de base

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.

Emmanuel F. Charland Stagiaire

Date : 10 juillet 2014

Supervisé par : Maxime Laplante-Bolin, ing. jr.

Date : 11 juillet 2014

Vérifié par : Félix Doucet, ing. M.Sc. A.

Date : 11 juillet 2014

Projet : AM-055-14

Type enrobé : EB-10C

Client : Jean-Pascal Blodreau, Chaire ISC Type bitume : PG 58-28

Note : Enrobé de base

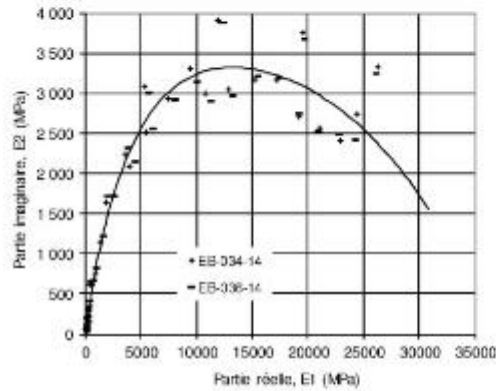
Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé : Carottes Cuve ISC

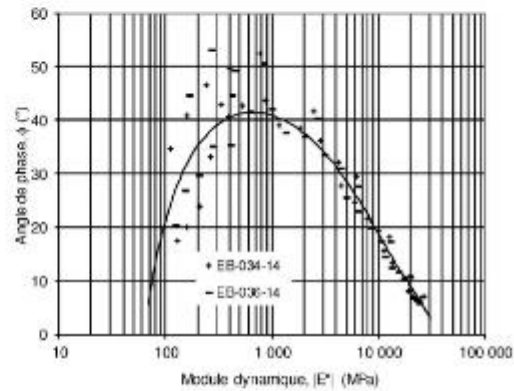
Teneur vides : 3,4%

Ajout :

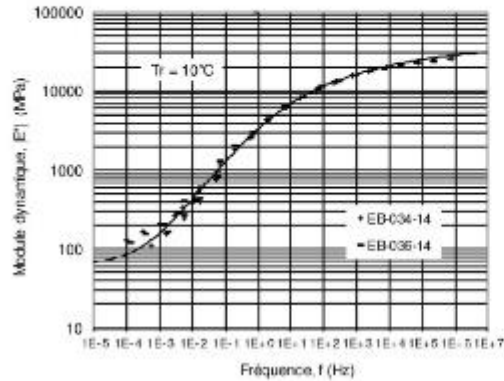
Module complexe dans le plan Cole et Cole



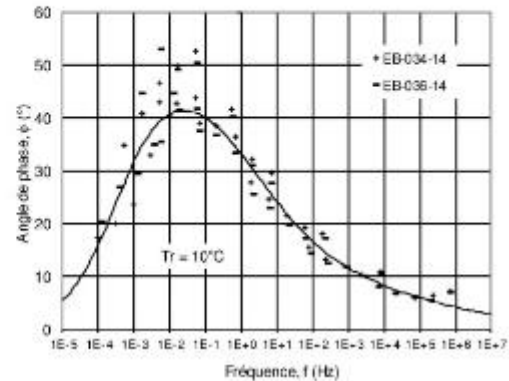
Module complexe dans l'espace de Black



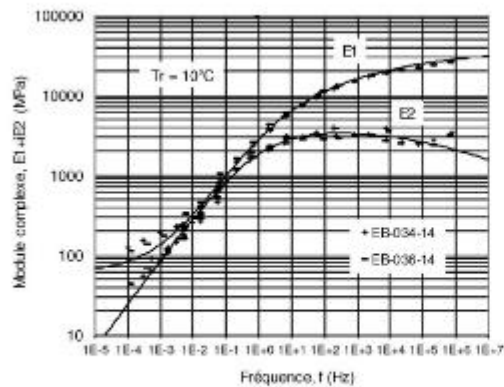
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



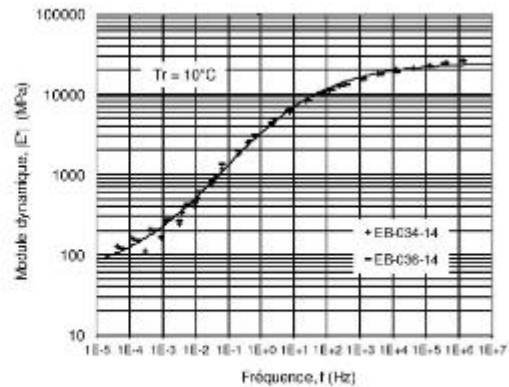
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe

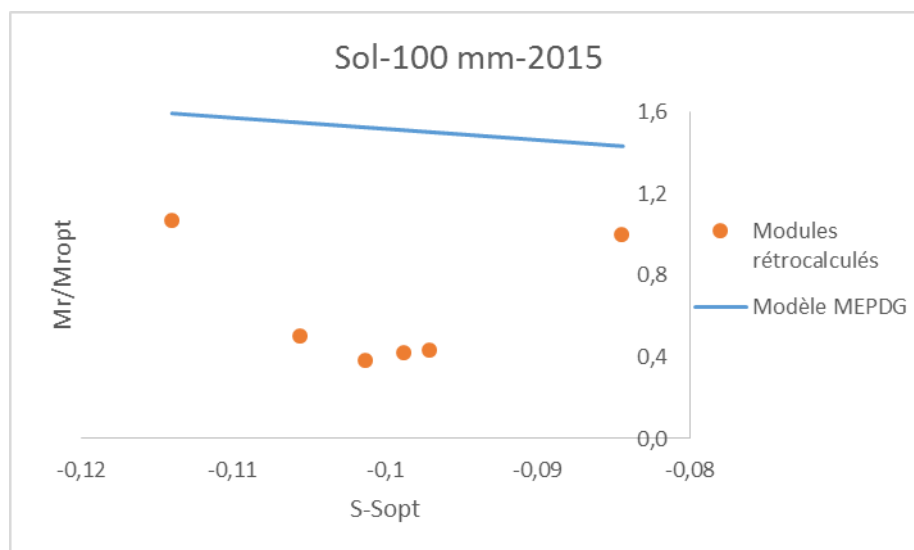
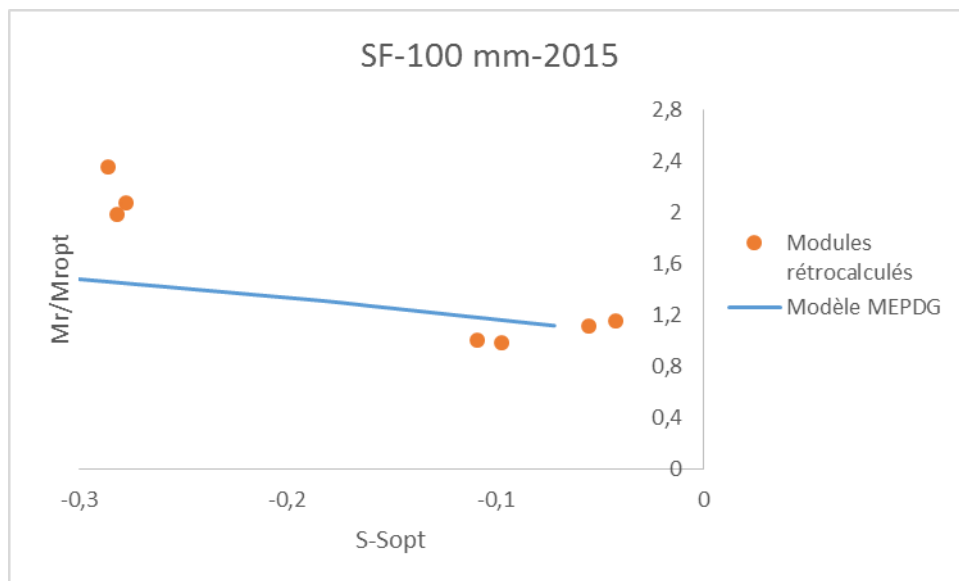


Courbe maîtresse Witczak de module dynamique

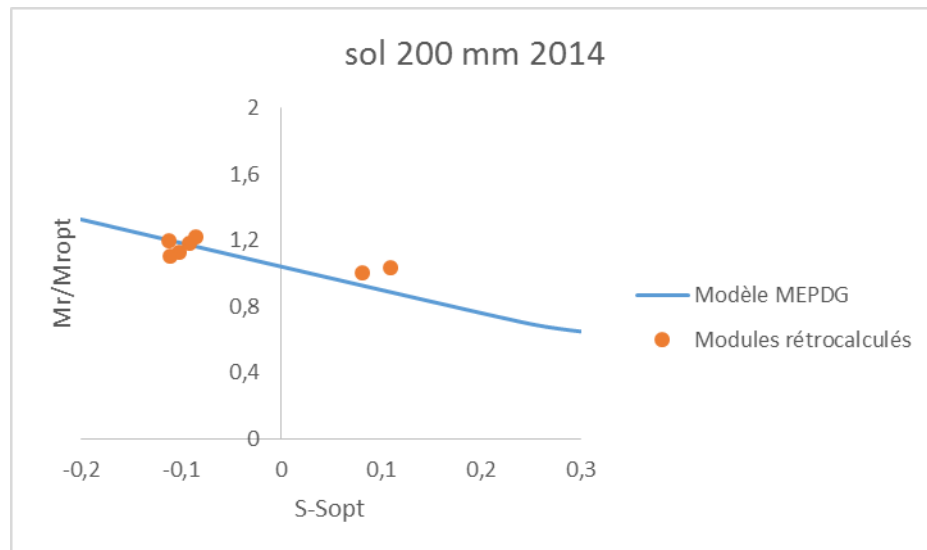
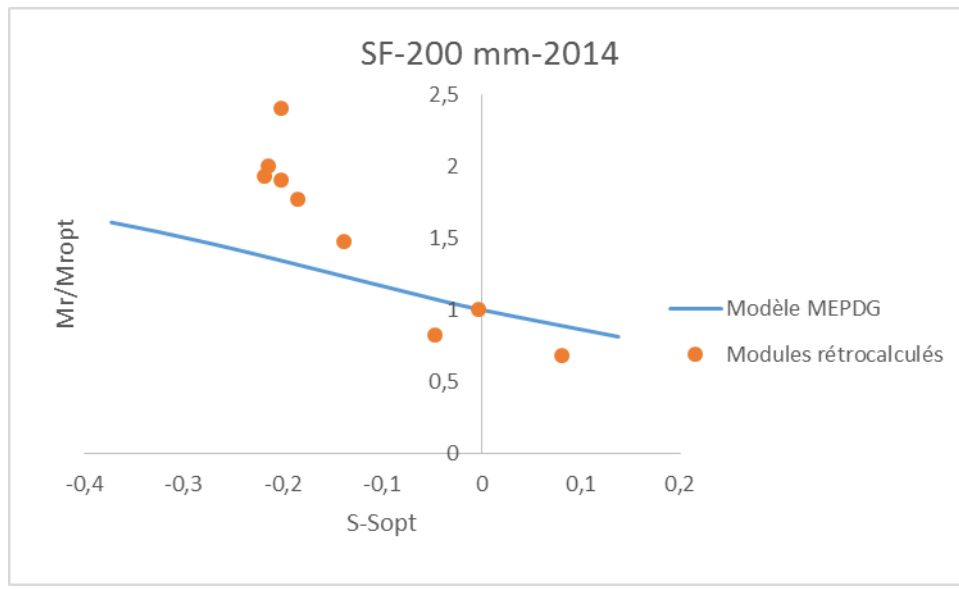


Annexe C: Modèle de prédiction du MEPDG

-Section 100 mm-2015



-Section 200 mm en 2014



-Section 200 mm en 2015

