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



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 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 d	es matières	v
Liste de	s tableaux	vii
Liste de	s figures	. viii
Remerc	iements	X
Chapitre	e 1 : Introduction	1
Chapitre	e 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
-	e 3 : Comparaison entre les résultats obtenus au SERUL et ceux obtenus dans la essai	
3.1	Introduction	
3.2	Comportement thermique	
a.	Rappel des paramètres thermiques	
b.	Présentation des résultats	
3.3	Comportement hydrique	
3.4	Comportement mécanique	
3.5	Conclusion	
Chapitre	e 4 : Modèle de prédiction des modules réversibles en fonction de la variation de n eau	e la
4.1	Introduction	
4.2	Modèle MEPDG	
4.3	Présentation des résultats	35
4.4	Conclusion	39
Chapitro	e 5 : Endommagement par fatigue	41
5.1	Introduction	
5.2	Calcul de l'endommagement par fatigue	41
5.2		
5.2	-	

	5.2.3	Détermination des déformations à la base du revêtement de l'enrobé	
	bitum	ineux ε	44
	5.2.4	Loi de Miner	47
	5.3 A	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
Cl	hapitre 6	: Discussion	67
	6.1 I	Discussion sur les essais au SERUL	67
	6.2 I	Discussion sur les essais dans la fosse	68
Cl	hapitre 7	: Synthèse des conclusions et recommandations	70
RI	ÉFÉREN	CES	73
A]	NNEXES	S	78
	Annexe	A : Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe au	
	SERUL.		79
		B: Rapports d'essais-enrobés : essais en traction-compression directe dans l	
		essai du laboratoire de géotechnique de l'Université Laval	
	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
SERUL7
Tableau 2-2 : Conditions imposées à la chaussée pendant le gel et dégel10
Tableau 2-3: Profondeur des 13 thermistances dans la fosse d'essai
Tableau 3-1 : Comparaison des données thermiques et environnementales entre le cycle I et
III19
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.jours28
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 fins32
Tableau 4-2: Teneur en eau optimale et masse volumique sèche maximale pour la sous-
fondation et le sol d'infrastructure
Tableau 4-3 : Recalibration des paramètres a et k _s
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.
Tableau 5-1 : Détermination du paramètre K_{F1} au SERUL et dans la fosse d'essai42
Tableau 5-2 : Paramètres utilisés pour la simulation avec Winjulea au SERUL45
Tableau 5-3 : Durée de chaque saison
Tableau 5-4 : Dates de début et de fin de la période de restriction de charges au SERUL50
Tableau 5-5 : Endommagement total pour la section 200 mm au SERUL selon les critères
du MTMDET54
Tableau 5-6 : Pourcentage de dommages en fatigue associé à chaque saison au SERUL
dans la section 200 mm selon les critères du MTMDET55
Tableau 5-7 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères
du MTMDET58
Tableau 4-8 : Pourcentage des dommages associés à chaque saison dans la section 100 mm
au SERUL selon les critères du MTMDET59
Tableau 5-9 : Endommagement total pour la section 100 mm au SERUL avec les critères
proposés selon les résultats de cette étude
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	
Figure 2-4 : Simulateur de charges lourdes de l'Université Laval	
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'interf	face
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'interf	
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'interf	
sous-fondation et sol d'infrastructure (à 750 mm de profondeur) dans la fosse d'essai e	
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 m	
profondeur dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015	
Figure 3-6 : Relation entre la profondeur de dégel et l'indice de dégel des températures	
mm de profondeur (ID ₅₀) dans la section 100 mm au SERUL	
Figure 3-7 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle I de	
fosse d'essai	21
Figure 3-8 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle II o	de la
fosse d'essai	22
Figure 3-9 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle III	
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 dan	s 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	on du
degré de saturation.	35
Figure 4-4: Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure en fonction	tion
du degré de saturation	
Figure 4-5 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation pour la se	ction
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 <u>objectifs généraux</u> 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 <u>objectifs spécifiques</u> 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.

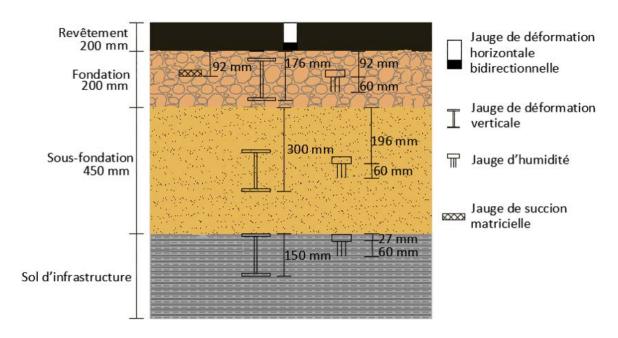


Figure 2-1: Instrumentation de la section 200 mm au SERUL

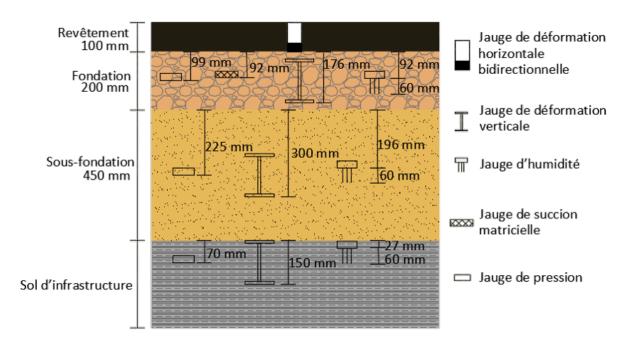


Figure 2-2: Instrumentation de la section 100 mm au SERUL

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.

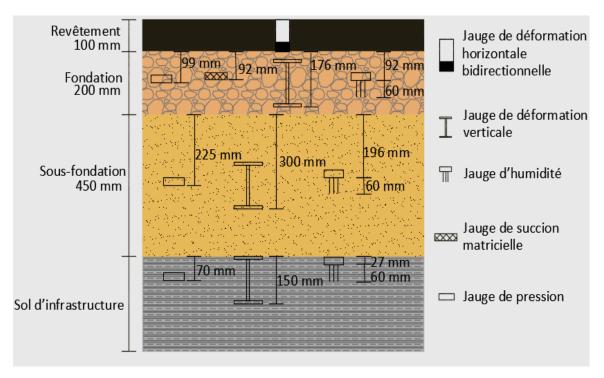


Figure 2-3 : Stratigraphie et l'instrumentation installée dans la fosse d'essai



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
1er gel	1.6	-10	1.5	5000 et 5500 kg
1er dégel	16	10	∞	5000 et 4000 kg
2ème 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 micouche de l'enrobé.	
3ème gel	0.8	-10	1.5	5000 et 5500 kg
3ème 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 sousfondation. 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 sousfondation 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 R² 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 entrainé 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 °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 °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 ID₅₀ 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.

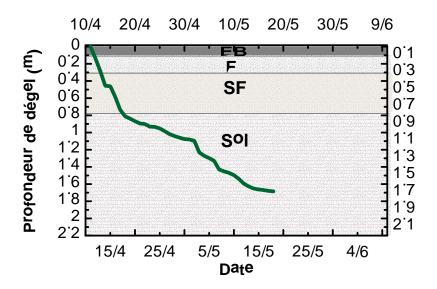


Figure 3-1 : Évolution de la profondeur de dégel dans la section 100 mm au SERUL en 2015

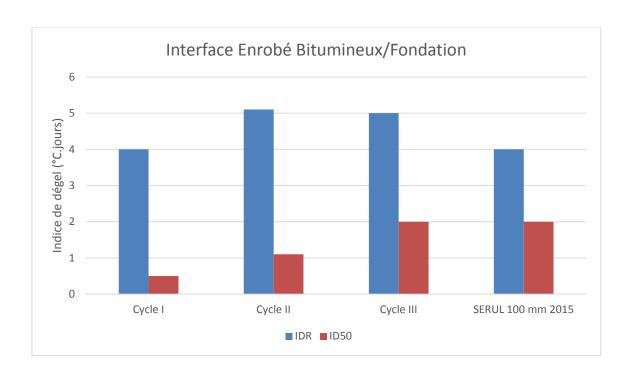


Figure 3-2 : ID_R et ID₅₀ nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface enrobé bitumineux et fondation (à 100 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

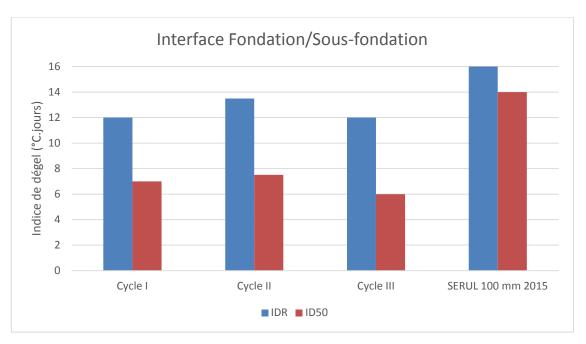


Figure 3-3 : ID_R et ID₅₀ nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface fondation et sous-fondation (à 300mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

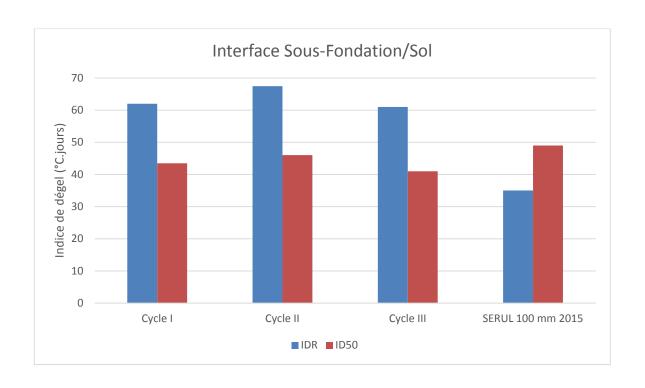


Figure 3-4 : ID_R et ID₅₀ nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à l'interface sous-fondation et sol d'infrastructure (à 750 mm de profondeur) dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

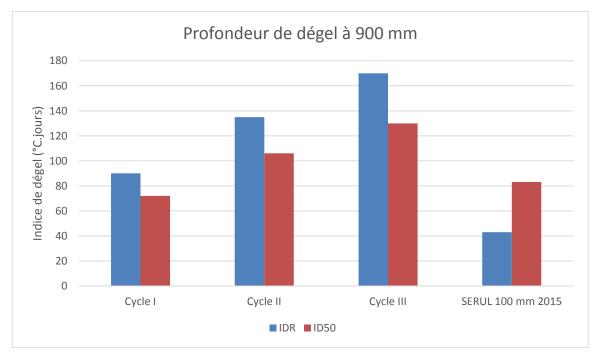


Figure 3-5 : ID_R et ID₅₀ nécessaires au dégel de la structure de chaussée jusqu'à 900 mm de profondeur dans la fosse d'essai et dans la section 100 mm au SERUL en 2015.

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 entraine 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 (ID₅₀) 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.

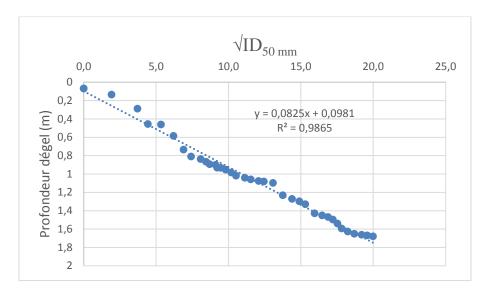


Figure 3-6 : Relation entre la profondeur de dégel et l'indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (ID_{50}) dans la section 100 mm au SERUL

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 :

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

Avec

X_{dégel} =profondeur de dégel (m)

ID₅₀ = Indice de dégel des températures à 50 mm de profondeur (°C.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.

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

Avec

 y_i : Profondeur de dégel réelle (m)

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

n : Nombre total de données

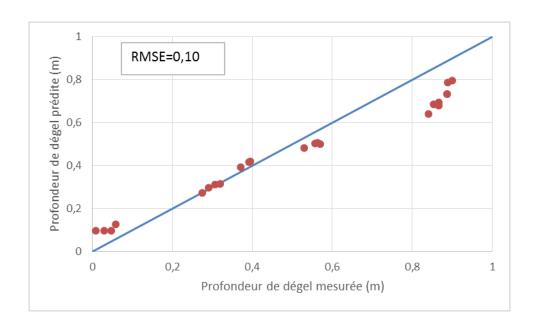


Figure 3-7 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle I de la fosse d'essai

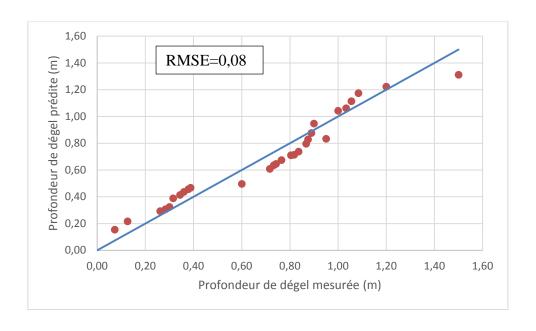


Figure 3-8 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle II de la fosse d'essai

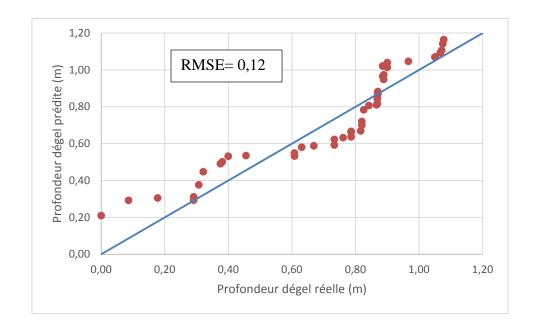


Figure 3-9 : Relation entre les profondeurs de dégel réelles et prédites pour le cycle III de la fosse d'essai

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 (ID₅₀), 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'ID₅₀ 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.

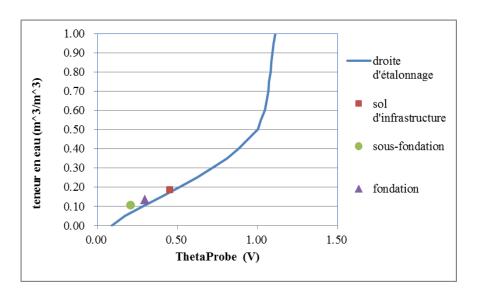


Figure 3-10 : Courbe de calibration des jauges ThetaProbe

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 :

$$\theta \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = 0.5202*V-0.0536$$
 [Équation 3-3]

$$w (\%) = \frac{\theta * \rho_w}{\rho_d} * 100$$
 [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/ m³)

 ρ_d : Masse volumique sèche (kg/m³)

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/ m³, 1930 kg/ m³ et 2124 kg/ m³ 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 entrainant 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 (ID₅₀) pour

le cycle I dans la fosse d'essai. Les déformations normalisées ont été calculées avec

l'équation 3-5

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_{temps\,t}}{\varepsilon_{\acute{e}t\acute{e}}} *100$$
 [Équation 3-5]

Avec:

 ϵ_n : Déformation normalisée (%)

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

εété : Déformation mesurée durant l'été (με)

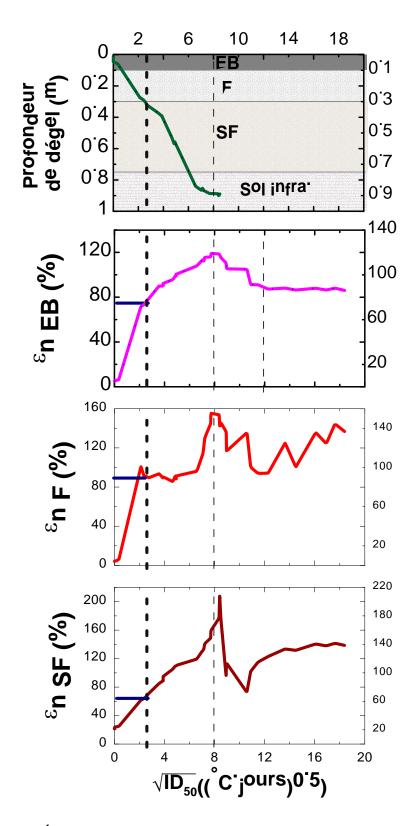


Figure 3-11 : Évolution de la profondeur de dégel et des déformations normalisées dans les couches de chaussées en fonction de $\sqrt{ID_{50}}$ pendant le cycle I de la fosse d'essai

D'après la Figure 3-11, il est possible de constater qu'avec un ID₅₀ 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 ID50 de 7 °C.jours

	ID ₅₀ de 7 °C.jours				
Essais	E _{n EB}	ε _{n F}	En SF	ID_R	Prof dégel
	(%)	(%)	(%)	(°C.jours)	(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 ID₅₀ 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 ID₅₀. 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'ID₅₀ 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'ID₅₀ 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	E _{n EB}	ε _{n F}	En 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 ID₅₀ 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 ID₅₀ 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.

 $log\frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b-a}{1+e^{(\beta+k_S(S-S_{opt}))}}$

[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})

31

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 ks 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.

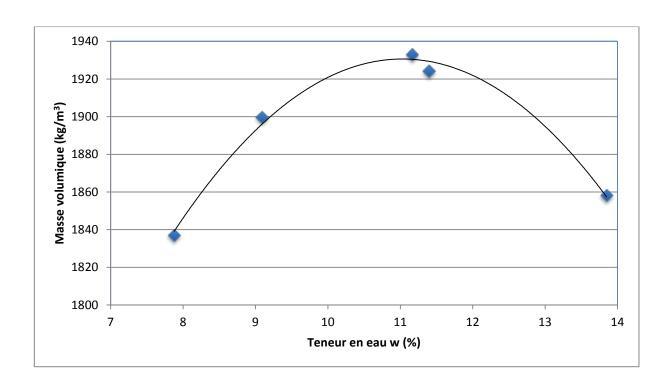


Figure 4-1 : Résultats de l'essai Proctor sur la sous-fondation (MG-112)

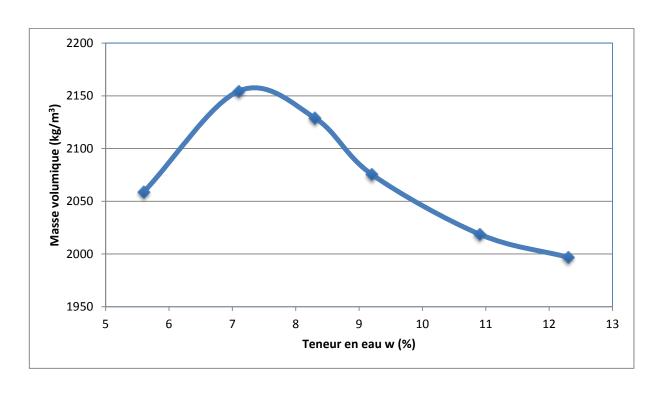


Figure 4-2 : Résultats de l'essai Proctor sur le sol d'infrastructure (SM)

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/m³)	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) :

$$e = \frac{n}{1-n}$$
 [Équation 4-2]

$$Sr = \frac{w \cdot G_S}{100 \cdot e}$$
 [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 %.

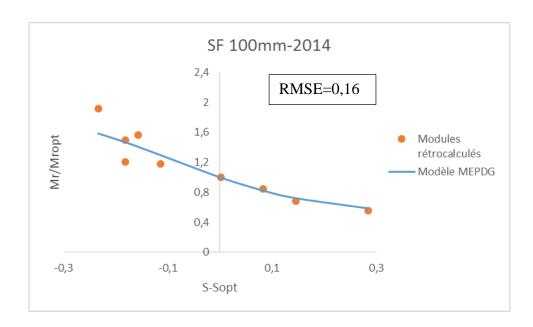


Figure 4-3 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation en fonction du degré de saturation.

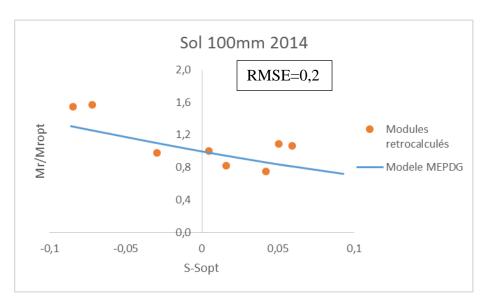


Figure 4-4 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure en fonction du degré de saturation

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 rétrocalculé. Néanmoins, afin d'ajuster le modèle aux matériaux utilisé, 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 ks

Couche	a	ks
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 rétrocalculés pour la sous-fondation et le sol d'infrastructure de la section 100 mm en 2014.

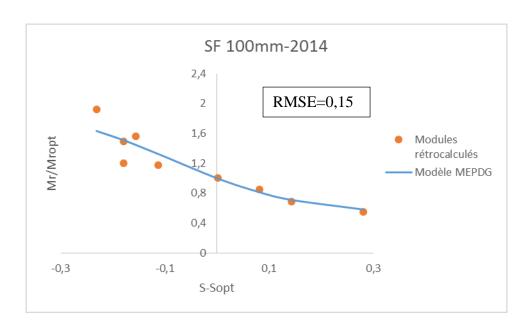


Figure 4-5 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés de la sous-fondation pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation.

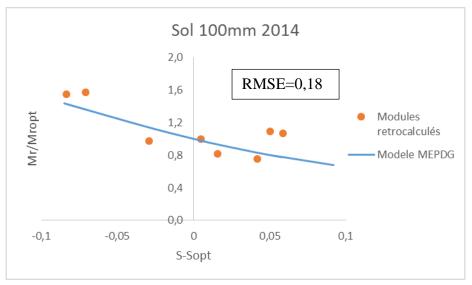


Figure 4-6 : Ratio des modules réversibles rétrocalculés du sol d'infrastructure pour la section 100 mm en 2014 en fonction du degré de saturation

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 sousfondation 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'infr	astructure	
		Teneur en eau		Teneur en eau	
	RMSE	la plus proche	DMCE	la plus proche	
		de l'optimum	RMSE	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 constituants, 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 :

$$N_F = 0.001135 * K_{F1} * |\varepsilon|^{-3.291} * E^{-0.854}$$
 [Équation 5-1]

$$K_{F1} = 10^{4.84 \times (\frac{V_{be}}{V_v + V_{be}} - 0.69)}$$
 [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 KF1 au SERUL et dans la fosse d'essai

Danam Maa	SERUL 100 mm	SERUL 200 mm	Fosse d'essai
Paramètres	(ESG 10)	(GB-20)	(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.

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

$$f_r = a_T * f$$
 [Équation 5-4]

$$log a_T = a_1 * (T - T_r) + a_2 * (T - T_r)^2$$
 [Équation 5-5]

Avec

|E*| est le module dynamique (MPa)

f_r est la fréquence réduite (Hz)

 δ , α , β , γ , α_1 et α_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)

Tr = 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.

$$f = 0,46 * V$$
 [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 (mm²)
Enrobé	0,35	• 40 (Charge référence)	
bitumineux	0,33	• 36 (Réduction de 10 % de la	
Fondation	0,35	charge référence)	70686
Sous-fondation	0,35	• 32 (Réduction de 20 % de la	70000
Sol d'infrastructure	0,45	charge référence)	

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.

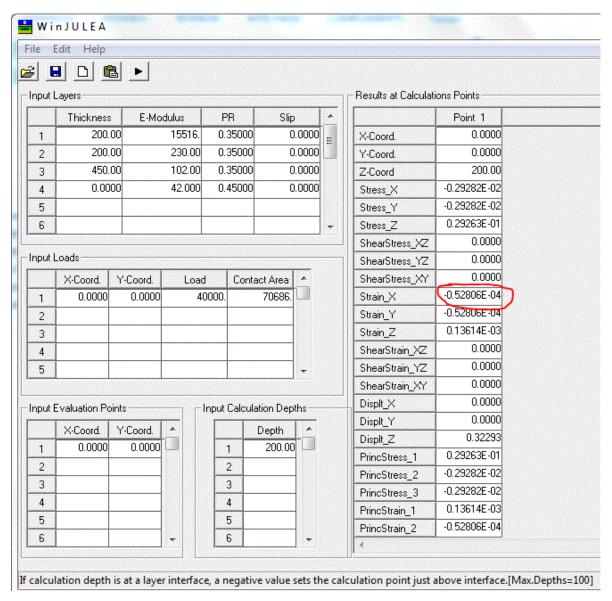


Figure 5-1 : Exemple calcul de la déformation en traction avec Winjulea le 24 avril 2014 pour la section 200 mm au SERUL

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.

$$D = \frac{n}{N_{adm}}$$
 [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 :

$$D = \frac{1}{N}$$
 [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.

$$D_{norm} = \frac{D_t}{D_{\delta t \delta}}$$
 [Équation 5-9]

Avec:

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

Dété: 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 :

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

$$D_{\text{\'et\'e}} = \frac{1}{N_{\text{\'et\'e}}}$$
 [Équation 5-11]

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

L'équation 5-9 peut donc s'écrire :

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

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

$$D_{norm} = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{\acute{e}t\acute{e}}}\right)^{3,291} * \left(\frac{E_t}{E_{\acute{e}t\acute{e}}}\right)^{0,854}$$
 [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.

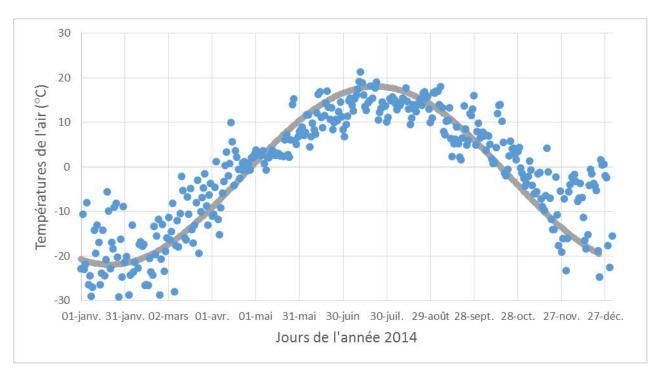


Figure 5-2 : Variation des températures de l'air à la Foret Montmorency en 2014

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 ID₅₀ 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'ID₅₀ 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.

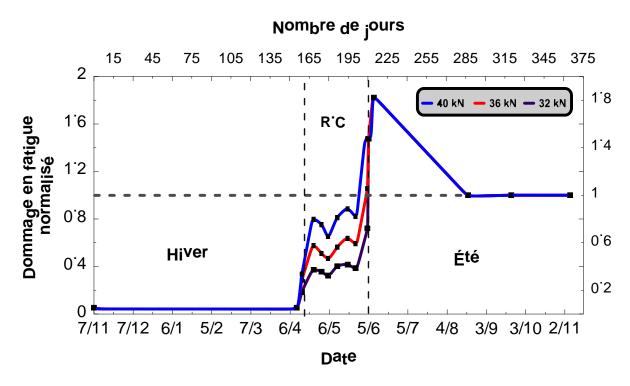


Figure 5-3 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

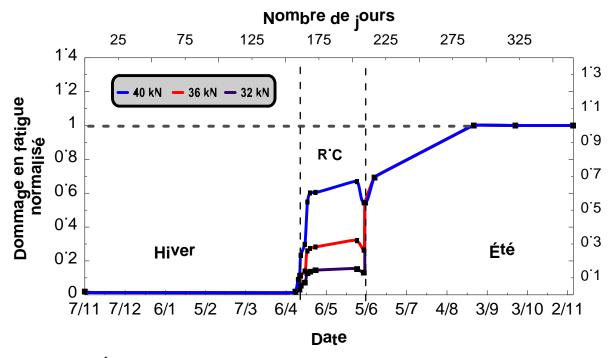


Figure 5-4 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

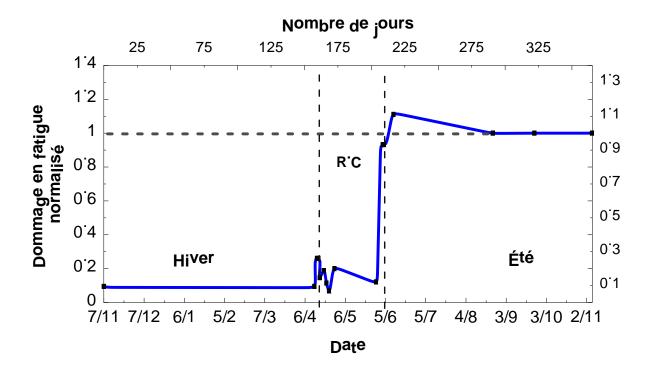


Figure 5-5 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 200 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformations)

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 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	Réduction 10 %	Réduction 20 %
	(40 kN)	(36 kN)	(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.

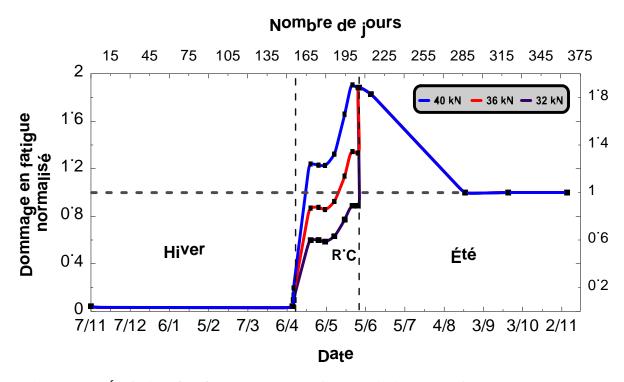


Figure 5-6 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2014 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

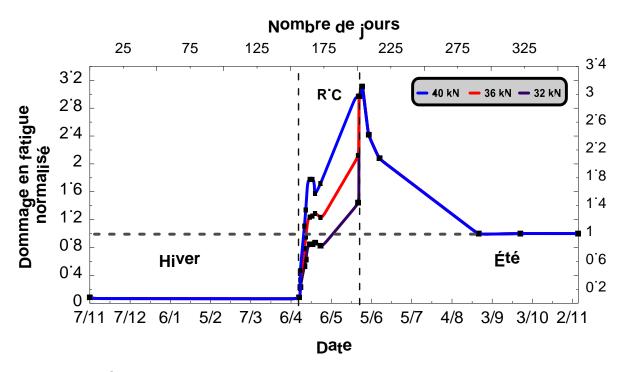


Figure 5-7 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec Winjulea)

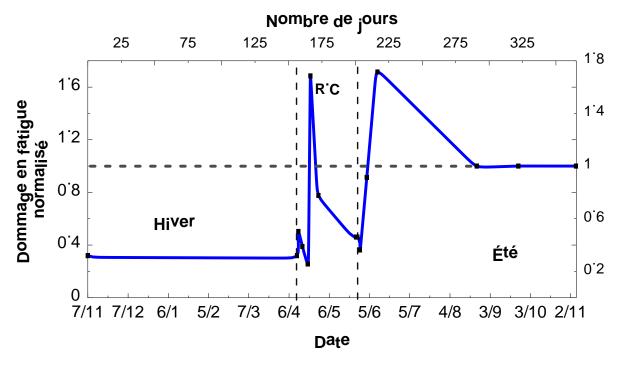


Figure 5-8 : Évolution des dommages normalisés en fatigue pour la section 100 mm au SERUL en 2015 (Déformations de l'enrobé bitumineux obtenues avec les jauges de déformation)

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

	Charge standard	Réduction 10 %	Réduction 20 %
	(40 kN)	(36 kN)	(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) entrainant 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'ID₅₀ 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	Réduction 10 %	Réduction 20 %
	(40 kN)	(36 kN)	(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 MTMDET 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 (MTMDET, 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.

Dommage total =
$$\frac{1.8 \text{ x (ASC printemps)} + 5 \text{ x (ASC hiver)} + 5.2 \text{ x (ASC hiver)} + 5.2 \text{ x (ASC hiver)}}{12}$$
 [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 (ID₅0) 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 (ID₅0) 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 équivalenet 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 %.

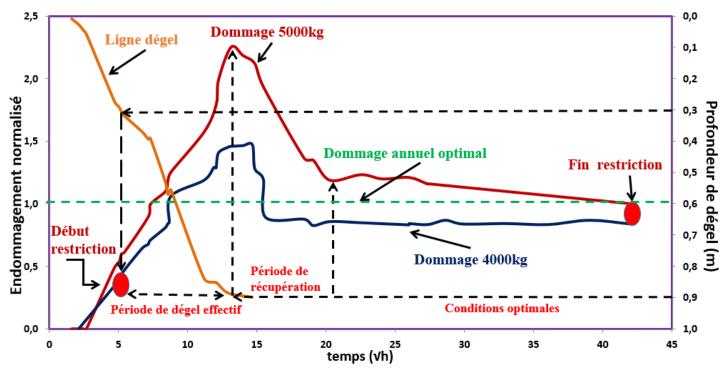


Figure 5-9: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle I.

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.

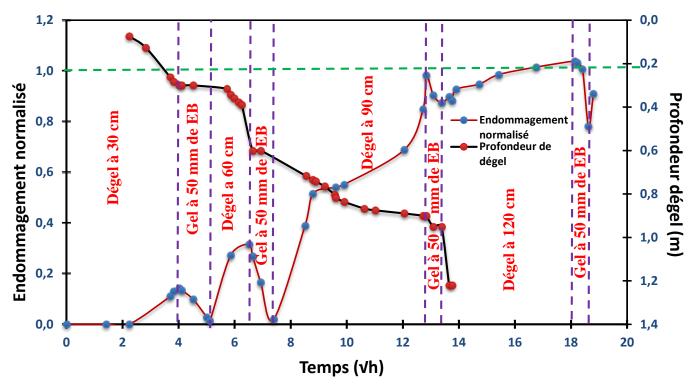


Figure 5-10: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle II.

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.

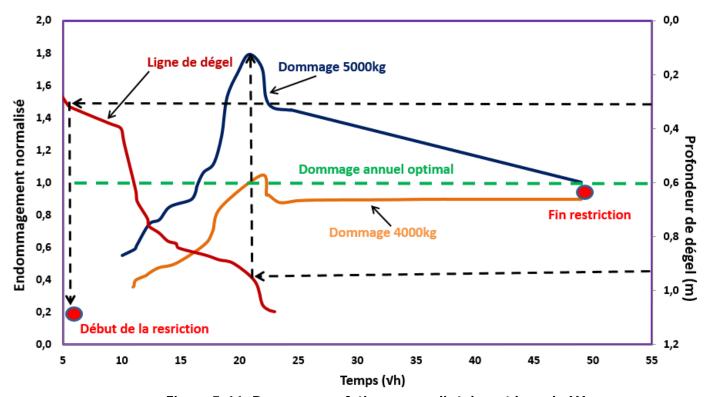


Figure 5-11: Dommage en fatigue normalisé durant le cycle III.

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 (ID₅₀) 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 (ID₅₀) 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 & 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 (ID₅₀) de 7 °C.jours. Cependant, afin d'optimiser la période de restriction de charges, un indice de dégel à 50 mm (ID₅₀) 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 (ID₅0) a été établie. Par conséquent, cet indice (ID₅0) 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 ID₅0 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 ID₅0 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 restriction 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 (ID₅₀) 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 (ID₅₀) 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 ID₅₀. 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 °C.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
- ✓ 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.

de l'ID₅₀ à l'aide des 52 stations météo routières du MTMDET.

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 maitrise 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 maitrise 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%A9

hicule%20lourd/D%C3%A9gel%
20%20Restriction%20des%20charges/fiches_degel_2015 Consulté le 1e 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 maitrise 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 maitrise 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 roar 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.

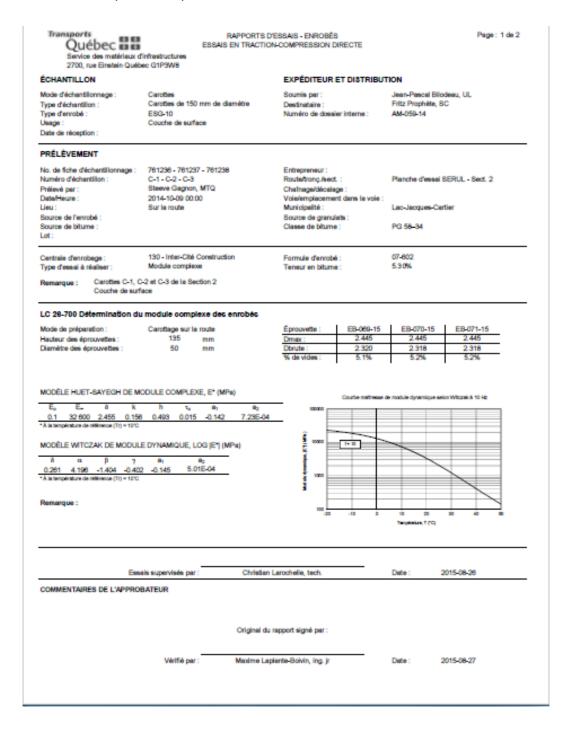
Scullion, T., 1988. Incorporating a Structural Strength Index into the Texas Pavement Evaluation System. Texas Transportation Institute, FHWA/TX-88/409-3F. 78p.

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 tractioncompression directe au SERUL

Section 2-ESG10 (100 mm) au SERUL



***	orts Qué	bec	88		PPORTS D		COMPRE		Éprouve		EB-009-	ıs		brute :		Page :	2 de 2
									Denalté :	max:	2.445		Teneur CV.	vides :	5.1%	E1	12
									(9)	(112)	(kPa)	(par)	(%)	(MPs)	ò	(MPa)	(MPs)
									-19.6	10	789.1	34.0	33	23 194	3.9	23 139	1 509
MODÈLE	HUET-	SAYEGH	DE MO	DULE O	OMPLEXE	E. (M	Pa)		-19.6 -19.6	3	662.6	30.5 29.6	34	21 700	5.0	21 010 20 325	1 876
		F	- E		-	1,4	10	*0	-19.6	0.3	570.7	30.1	32	10 909	6.1	18 832	2 007
$E^{\phi} - E_i$	· † 1.	r Slice	-1" 4	(tour)	b				-19.6	0.1	541.4	31.1	32	17 390	6.0	17 267	2 005
		roupo	٠, ٠	(ame)			og E1 = og E2 =	0.072	-9.0 -9.0	10	647.2	47.0	14	17 010	7.1 0.1	17 464	2 174
$\Gamma = a_T$	-					R ³ log f		0.99	-9.0	- 7	567.0	39.7	15	14 300	0.9	14 129	2 207
$\log a_{\tau}$ -	- a, (1	$r-T_c)$	$+a_{2}()$	$\Gamma - T_r$)2	R ² log (2 -	0.99	-9.0	0.3	511.0	40.5	15	12 645	10.1	12 450	2 211
					_			103	0.3	10	459.0 643.2	41.3 54.1	6	11 135	10.3	10 957	1 982
Ε,	E.,	8	k	h	-		-	la	0.3	3	517.0	51.9	7	9 909	142	9 003	2 451
0.1 3	12 600	2.455	0.156	0.493	0.015	-0.142	7.23	E-04	0.3	0.3	420.6	50.2	9	8 380	15.5	8 075	2 242
									0.3	0.1	347.5	51.4	10	6 764 5 470	19.9	6 430 5 142	1 000
									10.0	10	309.6	49.7	8	7 442	19.1	7 001	2 440
									10.0	3	323.5	57.6	11	5 616	22.1	5 203	2113
MODÈLE	WITCZ	AK DE M	ooute	DYNAM	IOUE LO	G IES A	MPs)		10.0	0.3	227.1	52.2	13	4 354	24.5	3 961	1 807
									10.0	0.1	121.2	51.8	15	2 340	29.2	2 043	1142
log E*	-5-	+	α	e 1		Т, •	10	*0	19.9	10	178.2	54.0	13	3 297	31.1	2 823	1704
-, ,	'	$1+e^{i}$	a r yang,	le F		RMINE	og E° =	0.051	19.9	1	132.1 74.5	52.1	14	2 121	34.8	1742	1210
$f_r - a_r$	·- f					R* log		1.00	19.9	0.3	40.3	51.8	13	093	39.7	607	571
loga, -	- a. 6	r-T	+a.(T-T	12			103	19.9	0.1	29.2	51.8	13	564	44.2	404	393
2-7	-10			-				1.8	30.1	10	59.5	49.4	16	1 204	41.8	400	470
									30.1	1	22.3	52.8	14	402	45.3	297	300
8		Б	Y	No.					30.1	0.3	13.2	51.9	14	159	42.3	100	171
0.261	4.196	-1.404	-0.402	-0.145	5.010	1-04	-		39.6	10	33.1	80.5	12	411	50.1	203	107 316
									39.6	3	10.3	42.9	ā	240	48.9	157	181
									39.6	1	7.2	50.4	8	143	40.3	99	104
									39.7	0.3	3.4	51.8	8	91 65	44.7	46	40
Éprouvette		EB-070-1	5	Densité	brute :	2.318			Éprouve	_	EB4714		Densité		2.318		
Densité m		2.445		Teneur	vides :	5.2%			Densité		2.445		Teneur	vides :	5.2%		
(°C)	(H20	ū		CV.	100												_
-19.7		ALC: N			-	-	E1	E2	T	7	0	E	CV.	IE4		E1	E2
-19.7	10	(kPa) 617.6	(pr) 33.9	(%)	(MPs) 24 111	2.6	(MPs) 24 003	(MPa) 1 528	(°C)	(Hz)	(kPa) 807.9	(pr) 34.1	CV, (%)	(MPs) 23 702	(*) 5.1	(MPs) 23 000	(MPs) 2 110
	10	617.6 679.0	30.2	(%) 5 6	(MPa) 24 111 22 495	4.5	(MPs) 24 003 22 425	(MPs) 1 528 1 709	-19.6 -19.6	10	(kPs) 807.9 673.3	34.1	(%) 19 19	(MPs) 25 702 22 127	5.1	(MPs) 23 000 22 041	(MPs) 2 110 1 954
-19.7 -19.7 -19.7	10	017.0	33.9	(%) 5 6 7	(MPa) 24 111		(MPs) 24 003	(MPs) 1 528 1 789 1 732	-19.6	10	(kPs) 807.9	34.1	(%)	(MPs) 23 702		(MPs) 23 000	(MPs) 2 110
-19.7	10 3 1	617.6 679.0 625.2 596.6 566.6	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9	(%) 5 6 7 7 8	(MPs) 24 111 22 495 21 255 19 766 16 405	45	(MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 214	(MPa) 1 528 1 769 1 732 2 016 2 113	-19.6 -19.6 -19.6	10 3 1	673.3 615.6 582.6 553.4	34.1 30.4 29.6	(%) 19 19 19	(MPs) 25 702 22 127 20 775 19 277 10 139	5.1 5.9 6.1 8.0	(MPs) 23 900 22 041 20 965	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1	617.8 679.0 625.2 596.6 506.8	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9	(%) 5 6 7 7 8	(MPs) 24 111 22 495 21 255 19 766 18 405 17 577	45 47 59 66	(MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 314 17 455	(MPs) 1 526 1 769 1 732 2 016 2 113 2 065	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6	10 3 1 03 0.1	0/Pe) 807.9 673.3 615.6 582.6 553.4 846.3	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 46.6	(%) 19 19 19 10 21	(MPs) 23 702 22 127 20 775 19 277 16 139 16 093	5.1 5.9 6.1 6.0	(MPs) 23 000 22 041 20 005 19 109 17 903 17 972	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 006
-19.7 -19.7 -19.7	10 3 1 0.3 0.1	617.6 679.0 625.2 596.6 566.6	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9	(%) 5 6 7 7 8	(MPs) 24 111 22 495 21 255 19 766 16 405	45 47 59 66	(MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 214	(MPa) 1 528 1 769 1 732 2 016 2 113	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6	10 3 1 0.3 0.1	673.3 615.6 582.6 553.4	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5	(%) 19 19 19 19 10 21	(MPs) 25 702 22 127 20 775 19 277 10 139	5.1 5.9 6.1 8.0	(MPs) 23 606 22 041 20 665 19 169 17 963	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1	617.8 679.0 625.2 596.6 566.8 642.1 566.0 519.1	30.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7	(MPs) 24 111 22 495 21 255 19 796 18 435 17 577 15 056	45 47 59 66 67 78 89	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 603 10 314 17 455 15 711 14 231 12 500	(MPs) 1 528 1 769 1 732 2 016 2 113 2 065 2 158	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1	667.9 677.9 615.6 582.6 553.4 646.3 662.4 583.9	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 46.6 40.6	(%) 19 19 19 10 21 8 8	(MPs) 23 702 22 127 20 775 19 277 16 139 16 093 16 246 14 720 13 058	5.1 5.9 6.1 6.0 6.6 6.2 9.4	(MPs) 23 608 22 041 20 665 19 169 17 963 17 972 16 076 14 521 12 862	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 006 2 331 2 414 2 255
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1	017.8 679.0 625.2 596.6 566.8 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 41.2	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6	(MPs) 24 111 22 495 21 255 19 766 16 435 17 577 15 056 14 404 12 770 11 319	45 47 59 66 67 7.6 69 99	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 603 10 314 17 455 15 711 14 231 12 500 11 114	(MPs) 1 520 1 709 1 732 2 016 2 113 2 005 2 150 2 221 2 190 2 140	-19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3	667.9 677.3 615.6 582.6 553.4 646.3 662.4 583.9 539.3 473.7	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2	(%) 19 19 19 10 21 8 8 9 10	(MPs) 23 702 22 127 20 775 19 277 16 139 16 093 16 246 14 720 13 058 11 490	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3	(MPs) 23 908 22 941 20 965 19 169 17 963 17 972 16 076 14 521 12 962 11 266	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 086 2 331 2 414 2 255 2 250
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3	017.8 679.0 625.2 590.6 500.0 000.4 642.1 500.0 519.1 400.7	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 41.2 52.7	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6	(MPa) 24 111 22 495 21 255 19 766 18 435 17 577 15 058 14 404 12 770 11 319	45 47 59 66 67 7.6 69 99 10.9	(MPs) 24 003 22 425 21 154 19 003 16 314 17 455 15 711 14 231 12 500 11 114 12 244	(MPs) 1 520 1 709 1 732 2 016 2 113 2 065 2 150 2 221 2 196 2 140 2 475	-19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1	(kPa) 607.9 673.3 615.6 582.6 553.4 640.3 662.4 583.9 529.3 473.7 649.5	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8	(%) 19 19 19 10 21 8 8 9 10 11	(MPs) 23 702 22 127 20 775 19 277 16 139 16 093 16 246 14 720 13 058 11 490 12 071	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3	(MPs) 23 900 22 941 20 965 19 169 17 972 16 076 14 521 12 962 11 266 11 906	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 030 2 517 2 000 2 331 2 414 2 255 2 250 2 500
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 0.3 0.3	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	617.8 679.0 625.2 596.6 566.6 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7 657.8 550.2 449.1	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.0 41.2 52.7 52.2 50.3	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 18 19 21	(MPa) 24 111 22 495 21 255 19 766 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 2492 10 550 6 929	45 47 59 66 67 7.6 69 99 10.9 11.4 13.1 15.6	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 003 10 314 17 455 15 711 14 231 12 560 11 114 10 276 8 602	(MPs) 1 528 1 709 1 732 2 016 2 113 2 005 2 120 2 120 2 120 2 140 2 140	-19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 -9.2 -9.2	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	(kPa) 807.9 673.3 615.6 582.6 582.6 582.4 580.9 580.9 580.9 473.7 649.5 520.5 426.2	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2	(%) 19 19 19 10 21 6 6 7 10 11 9 11 13	(MPs) 25 702 22 127 20 775 19 277 10 139 16 093 16 246 14 726 13 056 11 490 12 071 10 119 8 490	51 59 61 60 62 94 99 11.3 12.0 14.1 10.4	(MPa) 23 000 22 041 20 065 19 109 17 903 17 972 16 070 14 521 12 062 11 200 9 815 6 145	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 066 2 331 2 414 2 255 2 250 2 500 2 404 2 396
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.3 0.3 0.3	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	617.6 679.0 625.2 590.6 560.5 006.4 642.1 560.0 519.1 466.7 657.6 550.2 449.1 371.6	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.0 41.2 52.7 52.2 50.3 51.3	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 18 19 21 21 23	(MPa) 24 111 22 465 21 255 19 766 18 405 17 577 15 058 14 404 12 770 11 319 12 462 10 550 8 29 7 254	45 47 59 66 67 78 69 109 11.4 13.1 15.0 17.0	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 003 16 314 17 455 15 711 14 231 12 580 11 114 10 276 8 602 6 916	(MPa) 1 528 1 709 1 732 2 016 2 113 2 005 2 158 2 221 2 190 2 148 2 475 2 396 2 190 2 190	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	(8Pa) 807.9 673.3 615.0 552.4 640.3 662.4 560.9 539.3 473.7 649.5 536.5 436.2 351.0	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2 51.3	(%) 19 19 19 10 21 8 8 9 10 11 11 13 16	0MPs) 25 702 22 127 20 775 19 277 10 139 16 246 14 720 13 056 11 400 11 10 119 6 6046 6 646	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.4 10.1	(MPa) 23 900 22 941 20 965 19 169 17 903 17 972 16 070 14 521 12 962 11 260 9 815 6 145 6 506	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 086 2 301 2 414 2 255 2 250 2 404 2 396 2 126
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 0.3 0.3	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	617.8 679.0 625.2 596.6 566.6 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7 657.8 550.2 449.1	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.0 41.2 52.7 52.2 50.3	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 18 19 21	(MPa) 24 111 22 495 21 255 19 766 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 2492 10 550 6 929	45 47 59 66 67 7.6 69 99 10.9 11.4 13.1 15.6	(MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 214 17 455 15 711 14 231 12 580 11 114 10 276 8 602 6 910 5 509	(MPs) 1 528 1 709 1 732 2 016 2 113 2 005 2 120 2 120 2 120 2 140 2 140	-19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -19.5 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 -9.2 -9.2	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	(kPa) 807.9 673.3 615.6 582.6 582.6 582.4 580.9 580.9 580.9 473.7 649.5 520.5 426.2	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2	(%) 19 19 19 10 21 6 6 7 10 11 9 11 13	(MPs) 25 702 22 127 20 775 19 277 10 139 16 093 16 246 14 726 13 056 11 490 12 071 10 119 8 490	51 59 61 60 62 94 99 11.3 12.0 14.1 10.4	(MPa) 23 808 22 941 20 865 19 109 17 963 17 972 14 521 12 862 11 266 11 300 9 815 6 556 5 5143	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 066 2 331 2 414 2 255 2 250 2 500 2 404 2 396
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.3 0.3 0.3 0.3	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	617.6 679.0 625.2 596.6 506.5 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7 657.0 657.0 2449.1 371.6	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.0 41.2 52.7 52.2 50.3 51.3 51.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 18 19 21 21 23	(MPs) 24 111 22 465 21 255 19 706 18 405 17 507 15 608 14 404 12 770 11 319 12 462 10 550 8 929 7 254 5 852	45 47 59 66 67 7.6 69 99 10.9 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 003 16 314 17 455 15 711 14 231 12 580 11 114 10 276 8 602 6 916	(MPa) 1 528 1 709 1 732 2 016 2 113 2 085 2 150 2 121 2 190 2 140 2 475 2 390 2 190 1 973	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 -0.2 -0.2 -0.2	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01	(kPa) 807.9 673.3 615.0 582.8 580.3 640.3 662.4 580.9 529.3 473.7 649.5 530.5 426.2 351.0 282.7	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2 51.3 51.5	(%) 19 19 19 10 21 0 0 0 10 11 13 16 16 16	(MPs) 23 702 22 127 20 775 19 277 10 139 10 240 14 720 13 055 11 490 12 071 10 119 8 490 6 046 5 466	51 59 61 60 62 94 99 11.3 12.0 14.1 16.4 16.1 20.4	(MPa) 23 900 22 941 20 965 19 169 17 903 17 972 16 070 14 521 12 962 11 260 9 815 6 145 6 506	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 066 2 331 2 414 2 255 2 250 2 464 2 390 2 120 1 917
-197 -197 -197 -197 -97 -97 -97 -97 -97 03 03 03 03 03 03 10.4 10.4	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	617.6 679.0 625.2 590.5 806.4 642.1 568.0 518.7 466.7 657.6 550.2 449.1 371.5 302.1 361.2 294.0 209.3	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 41.2 52.7 52.2 50.3 51.3 51.0 50.9 55.2 51.9	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 10 19 21 22 23 24 19 19 20	(MPa) 24 1111 22 465 21 255 19 766 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 319 12 482 10 550 7 254 5 852 7 392 4 030	45 47 59 66 67 7.8 6.9 9.9 10.9 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7 19.1 22.0 26.0	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 903 10 214 17 455 15 711 14 221 12 244 10 272 6 916 5 509 6 696 4 900 3 621	(MPa) 1 520 1 709 1 709 1 709 2 010 2 113 2 005 2 150 2 121 2 190 2 140 2 475 2 390 2 190 1 973 2 390 1 973 2 055 1 709	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 10.1 10.1 10.1	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 10 3 1 1 0 1 0	(674) 807.9 673.3 615.6 552.6 552.6 562.6 562.6 562.9 562.4 562.4 562.4 562.4 562.4 562.4 562.5 562.6 56	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 51.2 51.2 51.3 51.5 50.0 50.8 52.0	(%) 19 19 19 19 10 21 0 0 10 11 13 10 10 10 11 15	(MPa) 20 702 22 127 20 775 10 139 16 093 16 093 14 720 13 050 14 720 13 050 14 90 15 040 5 400 7 507 4 402	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 16.4 16.1 20.4 16.9 22.0 24.1	(MFh) 22 000 22 041 20 065 19 109 17 963 17 972 16 075 14 521 12 562 11 266 11 306 9 815 6 506 5 143 7 159 5 359 4 009	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 036 2 331 2 414 2 255 2 250 2 404 2 396 2 120 2 120 2 120 1 103
-197 -197 -197 -197 -97 -97 -97 -97 -97 03 03 03 03 03 104 104	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	617.6 679.0 625.2 596.6 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7 657.0 657.0 550.2 449.1 371.6 302.1 369.0 146.7	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.5 52.7 52.2 50.3 51.5 51.6 55.9 51.9	(%) 5 6 7 7 8 112 111 9 7 6 118 129 221 223 224 119 220 20	(MPa) 24 1111 22 465 21 255 19 706 18 405 17 577 15 606 14 404 12 770 11 249 10 550 6 929 7 254 5 652 7 090 5 322 4 030	45 47 59 68 67 78 89 109 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7 19.1 22.0 26.0 29.2	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 603 18 214 17 455 15 711 14 230 11 114 12 244 10 276 6 916 5 509 6 696 4 903 3 621 2 490	(MPa) 1 520 1 702 2 010 2 113 2 005 2 113 2 005 2 221 2 190 2 147 2 307 2 307 2 307 2 307 2 307 2 307 2 190 1 197 2 190 1 197 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 0 1 0	(874) 807.9 673.3 615.0 552.0 553.4 640.3 640.3 550.9 529.3 473.7 540.5 530.5 426.2 326.7 370.1 320.1 223.0 171.1	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2 51.5 50.0 50.8 52.0 50.8	(%) 19 19 19 19 10 21 8 8 9 10 11 13 16 18 12 14 15 17	0MPN) 20 702 22 127 20 775 10 139 10 090 14 7305 11 490 12 071 10 119 8 490 5 408 7 556 5 7756 4 402 3 200	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 16.4 16.4 10.9 22.0 24.1 26.8	(MPa) 22 900 22 941 20 900 17 903 17 972 16 070 14 5212 11 200 11 900 9 815 6 506 5 143 7 159 5 356 4 009 2 936	08Pa) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 086 2 331 2 414 2 255 2 250 2 500 2 120 1 917 2 446 1 033 1 462
-197 -197 -197 -197 -97 -97 -97 -97 -97 03 03 03 03 03 03 10.4 10.4	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	617.6 679.0 625.2 590.5 806.4 642.1 568.0 518.7 466.7 657.6 550.2 449.1 371.5 302.1 361.2 294.0 209.3	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 41.2 52.7 52.2 50.3 51.3 51.0 50.9 55.2 51.9	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 10 19 21 22 23 24 19 19 20	(MPa) 24 1111 22 465 21 255 19 766 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 319 12 482 10 550 7 254 5 852 7 392 4 030	45 47 59 66 67 7.8 6.9 9.9 10.9 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7 19.1 22.8 26.0	(MPs) 24 003 22 425 21 184 19 903 10 214 17 455 15 711 14 221 12 244 10 272 6 916 5 509 6 696 4 900 3 621	(MPa) 1 520 1 709 1 709 1 709 2 010 2 113 2 005 2 150 2 121 2 190 2 140 2 475 2 390 2 190 1 973 2 390 1 973 2 055 1 709	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 10.1 10.1 10.1	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 10 3 1 1 0 1 0	(674) 807.9 673.3 615.6 552.6 552.6 562.6 562.6 562.9 562.4 562.4 562.4 562.4 562.4 562.4 562.5 562.6 56	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 51.2 51.2 51.3 51.5 50.0 50.8 52.0	(%) 19 19 19 19 10 21 0 0 10 11 13 10 10 10 11 15	(MPa) 20 702 22 127 20 775 10 139 16 093 16 093 14 720 13 050 14 720 13 050 14 90 15 040 5 400 7 507 4 402	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 16.4 16.1 20.4 16.9 22.0 24.1	(MFh) 22 000 22 041 20 065 19 109 17 963 17 972 16 075 14 521 12 562 11 266 11 306 9 815 6 506 5 143 7 159 5 359 4 009	(MPa) 2 110 1 954 2 127 2 036 2 517 2 036 2 331 2 414 2 255 2 250 2 404 2 396 2 120 2 120 1 121 2 446 1 103
-19.7 -19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	617.6 679.0 625.2 596.6 566.6 606.4 642.1 566.0 519.1 466.7 657.6 550.2 449.1 371.6 302.1 361.2 449.1 371.6 146.7 106.7	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 52.7 52.2 50.3 51.0 50.9 55.2 51.9 51.9 51.9 53.0 54.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 10 19 21 23 24 19 20 20 20 21 10 17	(MPa) 24 111 22 452 12 255 19 786 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 219 12 402 10 550 5 322 7 090 5 322 4 000 2 000 3 000 2 501	45 47 59 68 67 78 69 99 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7 19.1 22.0 28.0 29.2 31.7 27.0 29.0	(MPs) 24 000 22 405 21 104 19 003 10 214 17 455 15 711 14 231 12 244 10 276 8 002 8 910 5 509 6 689 4 900 1 701 2 490 1 701 2 190	(NPa) 1 528 1 732 2 016 2 113 2 005 2 150 2 150 2 150 2 148 2 475 2 396 2 197 2 396 1 197 2 322 2 056 1 739 1 739 1 752 1 752 1 752 1 752 1 753 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 03 01 10 03 04 10 04 10 04 10 04 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	(874) 807.9 673.5 615.6 582.6 582.6 582.6 582.6 582.6 582.7 589.5 473.7 649.5 520.5 426.2 351.1 320.1 125.1 177.9	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 51.2 50.0 50.2 51.5 50.0 50.8 52.0 52.0 52.0 52.0 52.0 52.0 52.0 52.0	(%) 19 19 19 10 21 0 0 11 11 13 10 10 11 15 17 16 14 14 14	(MPa) 23 702 22 127 20 775 19 277 10 139 10 093 11 4720 13 053 11 490 14 720 10 119 8 490 5 400 5 400 5 7 556 5 77 4 402 3 200 2 419 3 2140	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 16.4 16.1 20.4 16.9 22.0 24.1 26.0 26.4 26.4 26.4 26.4 26.4 26.4 26.4 26.4	(MPa) 22 000 22 001 20 005 19 109 17 903 17 907 16 070 14 521 12 002 11 202 11 202 11 303 8 115 6 145 6 506 5 143 7 159 5 356 2 936 2 127 2 852 1 778	(MFN) 2 110 1 954 2 120 2 006 2 517 2 006 2 517 2 006 2 516 2 414 2 255 2 250 2 506 2 196 2 126 1 917 2 460 1 000 1 400 1 1 600 1 1 600 1 1 500
-197 -197 -197 -197 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	017.0 679.0 625.2 590.0 590.0 606.2 560.0 519.1 466.7 550.2 449.1 371.0 302.1 361.2 294.0 209.3 140.5 104.2 190.5 190.5 190.5	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.5 52.7 52.2 50.3 51.5 51.6 55.2 51.9 55.2 51.9 51.9	(%) 5 6 7 7 8 12 11 12 11 12 12 13 14 15 15 16 17 17 15 15 16 17 17 15	(MPs) 24 111 22 452 21 255 19 766 18 405 17 577 15 058 14 404 12 7709 12 492 10 550 0 829 7 254 5 852 5 322 4 030 2 030 2 030 2 030 2 030 2 030 3 030 2 531	4.5 4.7 5.9 6.6 6.7 7.6 6.9 9.9 10.9 11.4 13.1 15.0 17.0 19.7 19.1 22.0 26.0 29.2 31.7 27.6	0MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 314 17 455 15 711 14 231 12 244 10 276 8 002 9 910 5 509 4 900 3 621 2 490 1 701 3 267	(MPa) 1 520 1 732 1 732 2 016 2 113 2 016 2 115 2 205 2 215 2 221 2 140 2 475 2 390 1 973 2 390 1 973 2 390 1 779 1 392 1 799 1 392 1 711	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	(874) 807.9 673.3 615.6 582.6 583.4 646.5 589.3 473.7 649.5 536.5 436.2 351.0 262.7 375.1 230.0 171.1 125.1 170.6	34.1 30.4 29.6 30.2 30.5 40.8 40.8 39.7 40.5 41.2 53.8 52.0 50.2 51.3 51.5 50.0 50.8 52.0 50.8 52.0 51.7	(%) 19 19 19 19 10 21 0 9 10 11 13 10 12 14 15 17 10 14 14 14 15	(MPN) 23 702 22 127 20 775 19 277 10 139 10 040 14 720 13 051 11 490 12 071 10 119 6 490 5 400 7 500 5 777 4 402 2 200 2 419 3 294	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 16.4 16.1 20.4 16.9 22.0 24.1 26.8 20.4	(MPa) 23 900 22 900 22 901 20 905 19 109 17 973 16 070 14 521 12 902 11 900 9 815 6 506 5 143 7 159 5 356 4 009 2 930 2 127 2 952	(MFN) 2 110 1 954 2 127 2 030 2 517 2 000 2 331 2 414 2 250 2 404 2 390 2 120 2 120 1 917 2 440 1 103 1 405 1 105 1 105
-19.7 -19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3 -0.3	10 3 1 03 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	017.0 679.0 679.0 625.2 590.0 500.0 600.4 642.1 560.0 519.1 460.7 657.0 550.2 449.1 371.0 302.1 371.0 302.1 371.0 302.1 371.0 302.1 371.0 302.1 371.0 302.1 371.0	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.0 41.2 52.7 52.7 50.3 51.0 50.9 55.9 51.9 51.9 51.9 51.0 51.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 9 7 6 10 19 21 23 24 19 20 20 20 21 10 17	(MPa) 24 111 22 452 12 255 19 786 18 405 17 577 15 658 14 404 12 770 11 219 12 462 10 550 5 322 7 090 5 322 4 000 2 000 3 000 2 501	45 47 59 68 67 78 69 99 109 11.4 13.1 15.6 19.7 19.1 22.8 26.0 29.2 21.7 27.8 28.0 29.2 21.7 27.8 28.0 29.2 20.2 20.2 20.2 20.2 20.2 20.2 20	(MPs) 24 003 22 425 21 104 19 003 10 314 17 455 15 711 14 221 12 244 10 276 8 602 6 916 5 509 6 669 4 900 3 241 3 244 10 376 11 244 10 376 11 3 267 11 3 267 11 3 267 11 3 267 11 3 267 11 3 267 11 3 267 11 544 1 053	(NPa) 1 520 1 709 1 772 2 015 2 115 2 125 2 125 2 126 2 126 2 127 2 120 2 127 2 120 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.2 0.2 0.2 0.2 0.2 10.1 10.1 10.1 10.1 1	10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 03 01 10 03 04 10 04 10 04 10 04 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	(674) 807.9 607.3 615.0 552.4 846.3 662.4 550.9 509.9 509.5 540.5 520.5 520.5 520.1 200.1 200.1 170.0 177.0 177.0 177.5 474.5 575.1 177.0 177.0 177.5 474.5 475.1 177.0 177.5 474.5 475.1 177.0 177.5 475.5 476.5 47	34.1 30.4 30.2 30.5 40.8 30.7 40.5 50.0 50.2 50.3 50.5 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0	(%) 19 19 19 10 21 0 0 11 11 13 10 10 11 15 17 16 14 14 14	(MPN) 23 702 22 127 20 775 19 277 16 139 16 240 14 720 13 050 11 490 12 071 10 119 6 490 6 040 5 490 5 775 4 402 3 204 2 1419 3 294 2 146 1 446	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.4 10.4 10.3 22.0 24.1 20.4 20.4 20.4 20.4 20.4 20.4 20.4 20.4	(MPa) 23 900 22 901 20 905 19 109 17 903 17 972 16 070 14 521 12 906 11 206 11 206 11 206 11 206 11 300 9 815 6 506 5 143 7 159 5 358 4 009 2 932 2 127 2 852 1 744	(MPs) 2 110 1 954 2 127 2 106 2 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 2 110 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 1 10 0.3 0.1 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	017.8 679.0 679.0 590.6 590.6 590.6 600.4 642.1 590.0 519.1 371.8 302.1 361.2 294.0 209.3 140.7 140.7 140.3 140.5	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 51.2 50.3 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 11 9 7 6 10 19 21 19 22 23 24 19 19 20 20 21 11 15 15 16 17 17 18 18 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19	(MPs) 24 111 22 465 21 255 19 706 18 405 17 577 15 656 14 504 12 770 11 249 10 550 6 929 7 254 5 852 7 690 2 900 2 900 2 900 2 900 3 900 2 501 1 900 1	45 47 59 68 68 67 7.8 69 99 10.9 11.4 13.1 15.6 17.6 29.0 29.2 29.7 27.8 29.8 31.7 29.8 31.7 42.7	(MPs) 24 003 22 405 22 425 21 194 19 903 15 711 14 221 14 221 12 244 10 279 8 902 8 902 9 910 5 509 8 690 3 621 2 490 1 701 3 207 2 190 3 207 2 190 3 503	(NPa) 1 528 1 709 1 722 2 016 2 2 113 2 005 2 2 113 2 005 2 2 21 2 150 2 2 22 2 198 2 475 2 396 2 198 2 197 2 198 2 197 2 198 2 198 3 198 4 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	0674) 807.9 607.9 615.0 582.4 583.4 583.9 58	34.1 30.4 30.2 30.5 40.8 40.8 40.8 50.0 50.2 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0	(%) 19 19 19 10 21 6 6 7 10 11 13 10 10 11 11 11 12 14 15 17 16 14 14 15 12 10 0 0	(MPN) 23 702 23 127 20 775 19 277 10 139 10 090 13 050 11 490 13 050 11 490 5 480 5 480 5 7 587 4 482 3 294 2 1460 913 5 593	5.1 5.9 6.0 6.0 6.0 8.2 9.9 11.3 12.0 14.1 10.1 20.4 10.1 20.8 20.4 20.0 34.1 37.8 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39	(MPa) 23 900 23 900 22 941 12 965 19 109 17 963 17 972 18 070 14 521 12 962 11 206 11 206 9 815 6 145 6 506 5 143 7 159 5 356 4 089 2 937 2 17 2 852 1 744 1 707 4 44 1 966	(MPs) 2 110 1 1954 2 127 2 127 2 126 2 127 2 126 2 127 2 126 2 127 2 126 2 126 1 1917 2 146 1 101 1 1 101 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 1 1 0.3 0.1 0.1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	017.8 078.0 025.2 590.0 045.2 590.0 0462.1 590.0 057.8 550.2 371.8 371.8 371.8 371.8 371.8 371.8 302.1 190.3 1	33.9 30.2 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.5 52.7 50.2 50.3 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0	(%) 5 6 7 7 7 8 12 11 9 7 8 19 21 22 23 24 19 20 20 20 21 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	(MPs) 24 111 24 465 21 255 19 706 18 405 17 577 15 058 14 404 12 770 11 198 12 482 10 550 8 299 7 254 5 852 2 4 030 2 000 2 001 2 001 1 005 1 257 1 1 109 676	45 47 59 68 67 78 89 109 11.4 13.1 13.1 12.0 19.7 19.7 19.7 22.0 29.2 21.7 27.6 29.2 21.7 42.7 42.7 44.2	(MPs) 24 003 24 003 24 003 24 003 24 003 25 005 005 005 005 005 005 005 005 005	(NPw) 1 520 1 709 1 702 2 016 2 113 2 005 2 113 2 005 2 121 2 190 2 121 2 190 2 190 2 190 1 973 2 190 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -0.2 -10.1 -10.	10 3 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	(6Pa) 807.9 807.9 615.6 582.8 580.9 589.3 649.5 530.5 473.7 649.5 530.1 230.1 230.1 171.1 177.9 75.5 47.4 30.5 71.9 46.0	34.1 30.4 40.5 30.2 20.5 40.8 52.0 51.3 51.3 51.3 51.3 51.3 51.3 50.5 50.5 50.5 50.5 50.5 50.5 50.5 50	(%) 19 19 19 10 10 21 8 8 9 10 11 15 16 10 12 14 15 17 16 13 12 10 8	(MPN) 23 702 22 127 20 775 19 277 10 139 10 093 10 093 11 490 12 071 10 119 8 490 6 040 5 400 5 7 556 5 777 4 402 2 419 3 200 2 419 3 2140 1 440 913 580 1 400 650	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 6.0 8.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.4 10.1 10.4 10.1 10.4 10.1 10.4 10.1 10.4 10.1 10.4 10.1 10.1	(MFa) 23 900 22 941 29 965 19 199 17 963 17 972 16 070 14 521 12 962 11 296 11 296 11 396 11	(MPs) 2 110 1 954 1 10 1 954 2 127 2 127 2 126 2 127 2 126 2 127 2 126 1 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 1
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 1 10 0.3 0.1 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 0.3 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	017.8 679.0 679.0 590.6 590.6 590.6 600.4 642.1 590.0 519.1 371.8 302.1 361.2 294.0 209.3 140.7 140.7 140.3 140.5	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 39.4 40.6 51.2 50.3 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 11 9 7 6 10 19 21 19 22 23 24 19 19 20 20 21 11 15 15 16 17 17 18 18 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19	(MPs) 24 111 22 465 21 255 19 706 18 405 17 577 15 656 14 504 12 770 11 249 10 550 6 929 7 254 5 852 7 690 2 900 2 900 2 900 2 900 3 900 2 501 1 900 1	45 47 59 68 68 67 7.8 69 99 10.9 11.4 13.1 15.6 17.6 29.0 29.2 29.7 27.8 29.8 31.7 29.8 31.7 42.7	(MPs) 24 003 22 405 22 425 21 194 19 903 15 711 14 221 14 221 12 244 10 279 8 902 8 902 9 910 5 509 8 690 3 621 2 490 1 701 3 207 2 190 3 207 2 190 3 503	(NPa) 1 528 1 709 1 722 2 016 2 2 113 2 005 2 2 113 2 005 2 2 21 2 150 2 2 22 2 198 2 475 2 396 2 198 2 197 2 198 2 197 2 198 2 198 3 198 4 1	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	0674) 807.9 607.9 615.0 582.4 583.4 583.9 58	34.1 30.4 30.2 30.5 40.8 40.8 40.8 50.0 50.2 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0	(%) 19 19 19 10 21 6 6 7 10 11 13 10 10 11 11 11 12 14 15 17 16 14 14 15 12 10 0 0	(MPN) 23 702 23 127 20 775 19 277 10 139 10 090 13 050 11 490 13 050 11 490 5 480 5 480 5 577 4 480 2 419 3 294 2 1460 913 550	5.1 5.9 6.0 6.0 6.0 8.2 9.9 11.3 12.0 14.1 10.1 20.4 10.1 20.8 20.4 20.0 34.1 37.8 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39.3 39	(MPa) 23 900 23 900 22 941 12 965 19 109 17 963 17 972 18 070 14 521 12 962 11 206 11 206 9 815 6 145 6 506 5 143 7 159 5 356 4 089 2 937 2 17 2 852 1 744 1 707 4 44 1 966	(MPs) 2 110 1 1954 2 127 2 127 2 126 2 127 2 126 2 127 2 126 2 127 2 126 2 126 1 1917 2 146 1 101 1 1 101 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 0.3 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	617.8 678.0 625.2 590.6 600.4 642.1 560.0 571.8 550.2 469.1 371.8	33.9 30.2 30.3 30.9 40.5 39.4 40.5 39.4 40.5 50.7 50.2 51.0	(%) 5 6 7 7 8 12 11 19 7 6 10 19 21 19 19 20 20 21 10 17 15 13 10 8	(MPa) 24 1111 22 485 21 255 19 766 18 405 17 577 15 656 14 404 12 770 11 282 10 550 8 929 7 254 5 852 7 090 5 003 2 000 3 600 2 501 1 005 1 00	45 47 59 68 67 78 89 109 11.4 13.1 15.0 19.7 19.1 22.0 29.2 29.2 29.2 29.7 77.6 42.7 44.7	(MPs) 24 003 24 003 24 003 24 003 24 003 24 005 24	(NPa) 1 528 1 709 1 702 2 010 2 2 113 2 005 2 211 2 150 2 221 2 190 2 475 2 390 2 190 1 973 2 307 2 307 1 709 1 390 1 709 1 390 1 711 1 250 934 650 650 650 650 650 650 650 650	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7	10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 1 1 0.3 1 1 1 0.3 1 1 1 0.3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	(6P4) 807.9.3 607.9.3 605.0 605.0 640.3 640.3 640.3 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.3	34.1 30.4 40.8 30.2 24.6 40.8 30.7 40.5 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0	(%) 19 19 19 10 10 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	08Ps) 23 702 22 127 20 775 16 139 16 030 14 72 071 16 030 14 72 071 16 030 16 030 17 20 17 14 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 8.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.4 10.4	(MPa) 23 900 22 901 22 901 27 902 901 17 902 91 17 902 91 17 903 91 17 902 91 10 900 91 17 902 902 903 91 10 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 902 903 902 903 902 903 902 902 902 902 902 902 902 902 902 902	0MPs) 2 110 1 1954 2 127 2 127 2 128 2 127 2 128 2 127 2 128 2 128 2 128 2 128 2 128 2 128 1 1917 1 1948 1 1205 578 329 527 7 178
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 10 0.0 0.	617.8 6178.0 625.2 590.6 6057.8 6057.8 6057.8 6057.8 6057.8 6057.8 550.2 448.1 550.2 248.1 3002.1 104.2 190.3 100.2 190.3 100.2 190.3 100.2 190.3 100.2 190.3 100.2 190.3 100.2 190.3 100.2 100.2 100.3 100.2 100.3 100.2 100.3 100.	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 40.5 40.5 50.2 50.3 51.9 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6	(%) 5 6 7 7 8 12 11 12 12 13 14 15 13 10 8 6 5	(MPs)	45 47 78 68 68 68 68 99 109 114 150 176 197 120 200 200 200 200 200 200 200 200 200	(MPs) 24 903 24 905 24 905 24 905 21 904 15 905 24 45 905 21 905 24 905 25 905 26 905	(MPs)	-19.6 -19.6	10 3 1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	(kPa) 807.9 3 607.9 3 605.0 6 550.4 8 560.9 5 550.4 8 560.9 3 473.7 6 590.5 5 426.2 3 200.1 1 200.1 1 200.1 1 201.1 1 201.0	34.1 30.4 40.8 30.2 24.6 40.8 30.7 40.5 50.8 50.0 50.5 50.0 50.0 50.0 50.0 5	(%) 19 19 19 10 10 11 11 13 16 16 16 17 17 10 14 15 12 10 6 6 6	08Fe) 23 702 22 127 20 775 19 277 20 775 19 277 10 139 10 104 13 105 14 720 13 105 14 720 13 105 14 720 13 105 14 720 13 105 14 10 119 19 10 119 10 119 10 119 10 119 10 119 10 119 10 119 10 119 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	5.1 5.9 6.1 6.0 6.2 9.4 9.4 11.3 12.0 14.1 10.4 10.4 10.9 20.4 20.5 20.4 20.5 41.5 30.5 41.5 41.5 41.5 41.5 41.5 41.5 41.5 41	(MPa)	08F91 2 110 1 1 954 2 127 2 1096 2 127 2 1096 2 2011 2 115 2 125 2 255 2 256 2 126 2 126 1 151 1 100 1 100 5 7 1 150
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 03 0.1 10 3 1 1 0.3 1 1 0.3 0.1 10 3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	617.8 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 682.1 682.1 682.1 682.1 682.1 682.1 682.1 682.1 682.2 682.2 682.3 682.1 682.3 682.3 682.3 682.3 682.3 682.3 682.3 682.	33.9 30.2 30.2 30.3 30.9 40.5 30.9 40.5 30.4 40.5 50.7 50.7 50.9 50.9 50.1 50.9 50.1 50.0 50.9 50.1 50.9	(%) 5 6 7 7 7 8 12 11 19 9 7 6 10 19 20 20 21 10 10 8 6	(MPa) 24 111 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	45 47 58 68 67 78 89 109 114 131 155 176 280 292 292 293 278 427 442 445	(MPs) 24 003 24 003 24 003 24 003 24 003 24 005 24	(MPa) 1 528 1 709 1 702 2 010 2 113 2 005 2 113 2 005 2 121 2 190 2 148 2 475 2 307 2 307 2 307 2 307 2 307 1 709 1 300 1 709 1 300 1 300 1 301 1 301	-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7 -4.7	10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 3 1 1 0.3 1 1 0.3 1 1 1 0.3 1 1 1 0.3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	(6P4) 807.9.3 607.9.3 605.0 605.0 640.3 640.3 640.3 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.2 640.3	34.1 30.4 40.8 30.2 24.6 40.8 30.7 40.5 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0	(%) 19 19 19 10 10 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	08Ps) 23 702 22 127 20 775 16 139 16 030 14 72 071 16 030 14 72 071 16 030 16 030 17 20 17 14 00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 8.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.4 10.4	(MPa) 23 900 22 901 22 901 27 902 901 17 902 91 17 902 91 17 903 91 17 902 91 10 900 91 17 902 902 903 91 10 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 91 902 903 902 903 902 903 902 903 902 902 902 902 902 902 902 902 902 902	0MPs) 2 110 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
-19.7 -19.7 -19.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -	10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.	617.8 6178.0 625.2 590.0 605.5 590.0 600.4 662.1 590.0 500.4 662.1 371.8 302.1 371.8 302.1 371.8 302.1 302.1 303.2 393.0 303.5 303.7	33.9 30.2 29.4 30.3 30.9 45.9 45.9 40.5 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 51.0 5	(%) 5 6 7 7 7 8 12 11 19 7 6 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	0MPa) 24 111 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	45 47 78 88 67 78 89 99 109 114 156 167 167 191 228 229 227 227 442 448 268 441 448 468 461	(MPs) 24 903 24 905 24 905 24 905 25 909 25	(MPs)	-19.6 -19.6	10 3 1 03 01 10 3 1 10 3 1 10 3 1 1 03 01 1 10 3 1 1 03 01 1 1 03 01 1 1 03 01 1 1 03 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01	(6Pa) 807.9.3 615.6 615.6 550.4 560.9 550.4 560.9	34.1 30.4 40.8 30.2 30.5 41.2 51.8 52.0 51.5 52.2 51.9 51.3 50.5 52.6 52.0 51.8 65.2 65.2 65.2 65.2 65.2 65.2 65.2 65.2	(%) 19 19 19 10 10 21 21 3 4 11 11 12 14 13 12 10 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	08Ps) 23 702 2177 20 775 21 10 139 21 10 139 21 10 139 21 10 10 12 071 10 139 21 10 10 12 071 10 130 20 11 450 21 20 11 10 10 12 071 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	5.1 5.9 6.1 6.0 6.0 6.2 9.4 9.9 11.3 12.0 14.1 10.1 10.1 10.2 22.0 24.1 30.0 30.0 30.0 41.0 30.0 41.0 40.0 40.0 40.0 40.0 40.0 40.0 4	(MPa)	08Fs) 2110 2110 1854 2127 2056 2257 2250 22664 2255 2250 22664 1917 2466 1205 553 363 363 365 355 277 178

Section 3-ESG 10 (200 mm) au SERUL

Transports RAPPORTS D'ESSAIS - ENROBÉS Page: 1 de 2 Québec ## ESSAIS EN TRACTION-COMPRESSION DIRECTE Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec G1P3W8 ÉCHANTILLON EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Mode d'échantillonnage : Carottes Jean-Pascal Bilodeau, UL Fritz Prophète, SC Carottes de 150 mm de diamètre Type d'échantilion : Destinataire : E8G-10 Numéro de dossier interne : AM-050-14 Type d'enrobé : Couche de surface Date de réception : PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761240 - 761241 - 761243 Entrepreneur: C-5 - C-8 - C-8 Steeve Gagnon, MTQ Numéro d'échantillon : Route/trong/sect.: Planche d'essai SERUL - Sect. 3 Prélevé per : Chafnage/décalage 2014-10-09 00:00 Date/Heure : Voie/emplacement dans la voie : Lieu: Municipalité : Lec-Jacques-Certier Source de l'enrobé : Source de granulats : Classe de bitume : Source de bitume : PG 58-34 Let: 130 - Inter-Cité Construction 07-602 5.30% Type d'essai à réaliser : Module complexe Teneur en bitume : Remarque: Carottes C-5, C-8 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 Hauteur des éprouvettes : Diamètre des éprouvettes : 50 MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa) 35 100 2.557 0.165 0.505 0.027 MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG JE" (MPa) 0.675 3.811 1.382 0.422 0.147 Remarque: Christian Larochelle, tech. Essais supervisés par : Date: 2015-08-28 COMMENTAIRES DE L'APPROBATEUR Original du rapport signé par : Maxime Laplante-Bolvin, ing. jr Vérifié par : Date: 2015-08-27

Trans	ovets Oué	bec	88		ES EN TRA	VESSAL ACTION- DIRECTI	COMPRES	SSION	Éprouve		EB-073-	15	Densité	brute :	2.306	Page :	
									Denalté :		2.445		Teneur		3.2%		
									(20)	(112)	(kPa)	(par)	CV.	(MPs)	0	(MPa)	(MPs)
									-19.6	10	849.3	32.1	33	20 419	3.3	26 375	1 531
cotu	HUET	SAYEGH	DE MO	DULE O	OMPLEXE	E (M	Pa)		-19.6	3	740.0	29.8	33	24 092	3.7	24 041	1 594
								*0	-19.6 -19.6	0.3	686.2 661.7	29.1	32	23 544	5.6	23 456	2 030
*-1	5. +-	Ε + δ(i ω	E			Т, •	10	-	-19.5	0.1	632.2	30.5	29	20 511	6.2	20 391	2 216
	" 1	+δ(iw	τ)" +	(iwr)			og E1 =	0.051	9.7	10	909.4	43.4	20	20 967	6.5	20 633	2 350
$-a_r$	-T _a					RMSE I R ² log E	og E2	1.00	-9.7 -9.7	3	780.6 681.5	39.9	19	19 050	7.7	18 879	2 544
	-01	$T-T_r$	+06	rr	1/2	R ² log I	2 -	0.99	-9.7	0.3	628.1	40.5	17	15 500	9.2	15 302	2 409
B. 44.7	-41	-1,)	+ a2 (-1,	,			102	-9.7	0.1	509.0	41.3	17	13 802	10.2	13 504	2 441
Ε.				_		_	_		0.3	10	709.0 626.3	48.2	17	14 736	10.9	14 472	2 779
20.1	35 100	2.557	0.165	0.505	0.027	-0.146	0.54	5-04	0.3	1	520.0	49.5	22	10 010	143	10 209	2 622
	-					-			0.3	0.3	440.0	51.4	26	8 691	16.2	0.345	2 427
									0.3	0.1	300.3	51.4	30	7 120	143	6 907	1703
									10.1	10	437.7	48.8	25 29	6 962	18.1	8 517	2 790
									10.1	1	273.7	52.1	31	5 256	24.5	4783	2 179
cotu	WITC	OK DE M	COULE	DYNAM	IQUE, LO	GJET (MPs)		10.1	0.3	199.9	52.2	31	3 020	27.4	3 400	1700
						T. •	40	*0	10.1	10	145.9	50.4	29	2 815	29.0	3 757	1 989
gE^{ϵ}	-5	+ 1+0	ez e-ri-	63			10	¥	20.0	3	170.7	62.3	26	2 030	32.1	2 404	1 509
		1+e	ar yang.	nr.f		RMSE		0.034	20.0	1	104.5	52.5	23	1990	34.7	1 637	1 131
	7 · f					R* log	E* -	1.00	20.0	0.3	67.6	51.9	19	1 303	37.2	1 038	766
ga.	-a.0	$T-T_r$	+a.(T-T		i		4.7	20.0	10	45.5	50.6	16	1700	38.2	1 331	1 007
2-7								30 800	30.0	3	40.0	47.7	15	1 024	42.0	701	665
									30.0	1	33.6	52.6	12	629	44.5	450	448
875	3.011	-1.362	-0.422	-0.147	6.00				29.9	0.3	13.0	52.0 51.8	11	366 251	42.4	205	260 188
	2.011	1.50	9.766	9.140	9.00				20.0	10	39.5	66.7	14	597	45.1	421	423
									39.9	3	16.9	47.8	13	353	43.6	250	243
									39.9	1	10.9	50.9	14	233	41.0	176	153
									39.9	-	16.9		-				
prouvel	te:	EB-074-	15	Densité	brute :	2.506			39.9 39.9 39.9	0.3	10.9	50.9 52.0	14	233 156	41.0	176	153
		EB-074- 2.445	15	Teneur	brute : vides :	2.306 3.2%			39.9	0.3 0.3	10.9 11.9 8.1	50.9 52.0	14 17	223 156 brute :	41.0 38.6	176 125	153 94
rebi :		2.445 0	15 E	Teneur CV,	vides :	3.2%	E1	E2	39.9 39.9 39.9 Eprouve Densité	0.3 te: max:	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445	50.9 52.0 15	14 17 Densité Teneur CV,	233 156 brute : vides :	41.0 30.8 2.353 3.8%	176 125	153 94
T (°C)			(5 (µr) 30.2	Teneur			E1 (MPu) 27 322	E2 (MPs) 1 051	39.9 39.9 29.9 Eprouve	0.3 0.3	10.9 11.9 8.1 EB-076-	50.9 52.0	14 17 Densité	223 156 brute :	41.0 38.8 2.353	176 125	153 94
(°C) 19.0 19.0	(Hz) 10 3	0 (kPa) 0 002.2 703.6	(pr) 32.2 29.0	CV, (%) 9 11	(MPa) 27 372 25 600	0 (7) 3.5 4.4	27 322 25 543	(MPa) 1 051 1 970	39.9 39.9 39.9 Eprouve Denaité : T (°C) -19.6	1 0.3 te: max: f (Hz) 10 3	10.9 11.9 6.1 EB-076- 2.445 0 (kPa) 600.1 729.0	50.9 52.0 15 (pr) 33.3 29.9	Densité Teneur CV ₄ (%) 30 31	233 156 brute : vides : [E7] (MPs) 25 953 24 426	41.0 38.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7	176 125 E1 (MPa) 25 803 24 344	153 94 (MPs) 1 902 1 990
(°C) 19.0 19.0 19.0	(Hz) 10 3 1	0 (kPa) 0 002.2 703.6 703.2	(ur) 32.2 29.0 29.1	CV. (%) 9 11 10	Videa : E* (MPa) 27 372 25 620 24 144	0 0 0 05 44 49	27 322 25 543 24 055	(MPs) 1 651 1 976 2 065	39.9 39.9 39.9 Eprouve Densité: (*C) -19.6 -19.6	1 0.3 te: max: r (Hz) 10 3 1	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445 0 (kPa) 600.1 729.0 675.3	50.9 52.0 15 (pr) 30.3 29.9 29.2	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30	233 156 brute : vides : [E7] (MPs) 25 953 24 426 23 134	41.0 36.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7 5.2	176 125 E1 (MPs) 25 863 24 344 23 040	153 94 (MPs) 1 902 1 990 2 092
(°C) -19.0 -19.0 -19.0	(Hz) 10 3	0 (kPa) 0 002.2 703.6	(pr) 32.2 29.0	CV, (%) 9 11	(MPa) 27 372 25 600	0 (7) 3.5 4.4	27 322 25 543	(MPa) 1 051 1 970	39.9 39.9 39.9 Denaité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6	1 0.3 te: max: f (Hz) 10 3	10.9 11.9 8.1 EB-070- 2.445 0 (kPa) 860.1 729.0 675.3 653.2	50.9 52.0 15 (pr) 33.3 29.9	Densité Teneur CV ₄ (%) 30 31	233 156 brute : vides : [E7] (MPs) 25 953 24 426 23 134 21 574	41.0 38.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7	176 125 E1 (MPa) 25 803 24 344	153 94 (MPs) 1 902 1 990
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0	0(2) 10 3 1 0.3	2.445 0 (kPa) 002.2 703.0 703.2 677.9	E (µr) 32.2 29.5 29.1 30.2	Teneur CV. (%) 9 11 10 11	Videa : (MPa) 27 372 25 600 24 144 22 403 21 255	3.2% 0 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107	(MPa) 1 051 1 970 2 005 2 392 2 503	59.9 59.9 39.9 Eprouve Densité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6	1 0.3 max: r (Hz) 10 3 1 0.3 0.1	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445 0 (kPs) 660.1 729.0 675.3 653.2 623.5 694.9	50.9 52.0 15 (pr) 33.3 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 26	233 156 brute : videa : [E ¹] (MPs) 25 93 24 420 23 134 21 574 20 133 19 710	41.0 30.0 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1	176 125 E1 (MPs) 25 000 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500	153 94 62 (MPs) 1 902 1 990 2 092 2 120 1 800 2 255
(°C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -4.7 -9.7	(Hz) 10 3 1 0.3	2.445 0 (kPa) 662.2 763.6 703.2 677.9 939.7 775.7	2 (pr) 32.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3	Teneur CV, (%) 9 11 10 11	Vides : [67] (MPs) 27.572 25.600 24.144 22.433 21.255 19.240	3.5 4.4 4.9 6.1 6.8	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005	(MPa) 1 851 1 976 2 065 2 392 2 503 2 503	59.9 59.9 59.9 Eprouve Cenatis: T (°C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -49.6 -49.6	1 0.3 te: max: 7 (Hz) 10 3 1 0.3 0.1	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445 0 (kPs) 860.1 729.0 675.3 650.2 520.5 694.9 727.2	50.9 52.0 15 (pr) 30.3 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4 40.7	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 26 32 31	233 156 brute : videa : [E ¹] (MPa) 25 923 24 420 23 134 21 574 20 133 19 716 17 890	41.0 30.0 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1	176 125 E1 (MPs) 25 003 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500 17 715	153 94 (MPs) 1 990 2 992 2 120 1 806 2 255 2 490
-19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6	0(2) 10 3 1 0.3	2.445 0 (kPa) 002.2 703.0 703.2 677.9	E (µr) 32.2 29.5 29.1 30.2	Teneur CV. (%) 9 11 10 11	Videa : (MPa) 27 372 25 600 24 144 22 403 21 255	3.2% 0 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107	(MPa) 1 051 1 970 2 005 2 392 2 503	59.9 59.9 39.9 Eprouve Densité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -19.6	1 0.3 max: r (Hz) 10 3 1 0.3 0.1	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445 0 (kPs) 660.1 729.0 675.3 653.2 623.5 694.9	50.9 52.0 15 (pr) 33.3 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 26	233 156 brute : videa : [E ¹] (MPs) 25 93 24 420 23 134 21 574 20 133 19 710	41.0 30.0 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1	176 125 E1 (MPs) 25 000 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500	153 94 62 (MPs) 1 902 1 990 2 092 2 120 1 800 2 255
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 10 3 1 0.3	2.445 0 (kPa) 662.2 763.6 703.2 677.9 939.7 775.7 665.6	r (pr) 32.2 29.5 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11	vides : [6"] (MPa) 27 372 25 600 24 144 22 403 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664	3.2% 0 7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 6.7	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109	(MPs) 1 851 1 976 2 085 2 392 2 503 2 802 2 622	59.9 59.9 59.9 Eprouve Cenate: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -49.6 -49.6 -49.6	1 0.3 te: max: 7 (Hz) 10 3 1 0.3 0.1 10 3	10.9 11.9 8.1 EB-076- 2.445 0 (kPa) 600.1 729.0 675.3 653.2 623.5 694.9 727.2 642.3	50.9 52.0 15 (pr) 30.3 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4 40.7 39.4	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 20 32 31 29	233 156 brute : videa : [E1] (MPa) 25 953 24 426 23 134 21 574 20 133 19 716 17 890 16 305	41.0 36.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.6 6.0 6.7	176 125 (MPa) 25 803 24 344 23 040 21 469 20 620 17 715 16 119	153 94 (MPs) 1 990 2 992 2 120 1 806 2 255 2 450 2 459
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	2.445 0 (PN) 662.2 763.6 703.2 677.9 939.7 775.7 665.6 624.6 563.9	r (µr) 32.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.6	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11 13 16	vides : [6"] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677	3.2% 6 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 8.4 8.7 9.5 12.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 189 15 236 13 344 14 410	(MPa) 1 651 1 976 2 065 2 392 2 503 2 602 2 622 2 543 3 034 2 760	39.9 39.9 39.9 Densité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6	1 0.3 max: F (Hz) 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10	10.9 11.9 6.1 2.465 0 (6Pa) 660.1 729.0 675.3 650.2 691.9 727.2 642.3 582.5 690.2	50.9 52.0 15 (pr) 29.9 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.1 41.3 49.2	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 20 32 31 29 25 22 15	203 156 brute : videa : [67] 25 953 24 426 25 134 21 574 20 133 19 716 17 590 14 505 14 501 14 501	41.0 30.8 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.0 6.0 6.7 9.0 11.3	176 125 (MPa) 25 903 24 344 23 040 21 496 20 052 19 500 17 715 16 119 14 305 12 723 13 903	53 94 52 (MPs) 1 902 1 990 2 126 1 806 2 255 2 450 2 452 2 452 2 532 2 532 2 532
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	(Hz) 10 3 1 0.3 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 2 1 0.3 3 1 0.3 0.1	2.445 0 (PN) 602.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.9 690.7 609.4	r (pr) 32.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.6 50.0	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11 13 16 13	vides : [6"] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 14 677 12 196	3.2% 0 7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 6.7 9.5 12.0 14.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 109 15 236 13 344 14 416 11 807	(MPa) 1 051 1 970 2 005 2 392 2 503 2 602 2 622 2 543 3 034 2 760 3 005	59.9 59.9 59.9 59.9 Consible T (C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.0 -9.0	1 0.3 max: r (Hz) 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 3	10.9 11.9 6.1 ED-076- 2.445 0 (kPa) 660.1 729.0 675.3 653.2 623.5 693.2 642.3 585.0 585.0 585.0 690.2 690.6	50.9 52.0 15 29.2 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.6 50.6	14 17 Densité Tensur CV, (%) 30 31 30 29 26 32 31 29 25 25 25 25	203 156 brute : videa : [67] (MPa) 25 953 24 426 23 134 20 133 17 890 16 305 14 588 12 973 14 001 11 958	41.0 30.8 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 0.0 0.0 0.7 9.0 11.3 10.3 12.5	176 125 (MPs) 25 503 24 344 23 040 21 469 20 052 17 715 16 119 14 365 12 723 13 003 11 074	153 94 1902 1 902 2 120 1 000 2 255 2 493 2 459 2 459 2 532 2 530 2 537
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	10 3 1 0.3 0.1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	2.445 0 (PN) 662.2 763.6 703.2 677.9 939.7 775.7 665.6 624.6 563.9	r (µr) 32.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.6	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11 13 16	vides : [6"] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677	3.2% 6 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 8.4 8.7 9.5 12.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 189 15 236 13 344 14 410	(MPa) 1 651 1 976 2 065 2 392 2 503 2 602 2 622 2 543 3 034 2 760	39.9 39.9 39.9 Densité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6	1 0.3 max: F (Hz) 10 3 1 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10	10.9 11.9 6.1 2.465 0 (6Pa) 660.1 729.0 675.3 650.2 691.9 727.2 642.3 582.5 690.2	50.9 52.0 15 (pr) 29.9 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.1 41.3 49.2	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 20 32 31 29 25 22 15	203 156 brute : videa : [67] 25 953 24 426 25 134 21 574 20 133 19 716 17 590 14 505 14 501 14 501	41.0 30.8 2.353 3.0% 0 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.0 6.0 6.7 9.0 11.3	176 125 (MPa) 25 903 24 344 23 040 21 496 20 052 19 500 17 715 16 119 14 305 12 723 13 903	53 94 52 (MPs) 1 902 1 990 2 126 1 806 2 255 2 450 2 452 2 452 2 532 2 532 2 532
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -2.7 -2.7 -2.7 -2.7 -2.7 -2.7 -2.7 -3.3 -3.3 -3.3 -3.3 -3.3 -3.3	0420 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1	2.445 7 8.9% 602.2 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.9 690.7 609.4 500.3 347.7	(µr) 30.2 29.0 29.1 30.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.0 50.0 51.2 51.4	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11 13 16 13 14 16 16 16	videa : E ¹ (MPa) 27 572 25 620 24 144 22 403 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677 12 196 10 245 6 763	32% 0 (7) 35 4.4 4.9 6.1 6.6 6.7 9.5 12.0 10.0 14.0 15.2 17.3 19.6	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 109 15 236 13 344 11 807 9 661 8 014 6 370	(MPa) 1 651 1 976 2 965 2 392 2 502 2 602 2 543 3 034 2 760 3 965 2 501 2 760 2 606 2 501 2 751	59.9 39.9 39.9 Eprouve Censité: T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.0 -9.0 -9.0 -9.0 -9.0 -9.0 -9.0 -9.0	1 0.3 max: F (Hz) 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1	10.9 11.9 8.1 11.9 8.1 0 (kPa) 0 600.1 729.0 675.3 653.2 623.5 694.9 727.2 642.3 585.0 596.5 690.2 435.9 510.2 435.9 510.2	50.9 52.0 15 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 39.4 40.7 50.6 49.2 50.6 49.2 50.6 51.7	14 17 Tensur CV. (%) 30 31 30 32 32 31 29 26 32 31 29 25 22 15 10 21 22 22 23 25 26 26 27 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28 28	233 156 bnute : videa : [E7] (MPs) 25 953 24 420 23 134 21 574 20 133 19 710 10 305 14 500 12 973 14 500 10 271 8 460 10 271 8 690 6 900	41.0 30.8 2.353 3.0% 0 (7) 42 4.7 5.2 5.7 5.1 0.0 0.0 0.7 9.6 11.3 10.3 12.5 13.8 15.8 16.1	E1 (MPs) 25 503 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500 17 715 16 119 14 365 12 723 11 674 9 976 8 170 6 641	153 94 1902 1902 2 190 2 190 2 155 2 493 2 459 2 451 2 530 2 537 2 447 2 537 2 477 2 176
(°C) -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -19.0 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7 -9.7	0420 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1	2.445 0 874) 602.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.6 430.3 347.7 456.6	(pr) 30.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.6 50.0 49.7 51.2 51.4 53.1	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 17 9 11 13 16 13 14 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	videa : [61] (MPa) 27 372 25 000 24 144 22 403 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 10 240 0 395 0 703 6 629	32% 0 35 44 49 6.1 6.6 6.7 9.5 12.0 10.0 14.0 15.0 16.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 189 15 236 13 344 14 416 11 807 9 861 8 014 6 370 8 180	(MPa) 1 651 1 976 2 065 2 392 2 502 2 602 2 602 2 543 3 034 2 760 3 065 2 501 2 271 2 749	59.9 39.9 39.9 59.0 59.0 59.5 59.5 59.5 59.5 59.5 5	1 0.3 te: mas: F (Hz) 10 0.3 1 0.3 1 0.3 1 10 0.	10.9 11.9 8.1 (6Pu) 680.1 729.0 675.3 653.2 623.5 694.9 727.2 642.3 585.0 696.9 727.2 642.3 653.5 696.2 696.	50.9 52.0 15 15 15 29.9 29.2 29.2 30.3 45.4 40.7 39.4 40.1 41.3 48.2 50.6 48.7 51.5 51.7 51.5	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 20 51 29 25 15 16 21 25 22 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25	203 156 brute : videa : [E1] (MPs) 25 920 24 420 23 134 21 574 20 133 19 710 17 590 14 500 12 973 14 001 11 926 6 900 6 5332	41.0 30.8 2.253 3.8% 9 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.6 6.0 6.7 9.6 11.3 12.5 13.8 15.8 15.8 15.8	176 125 25 903 24 344 23 040 21 459 20 052 19 500 17 715 16 119 14 365 12 723 13 903 11 674 9 976 6 170 6 641	153 94 1902 1 902 2 120 1 800 2 252 2 421 2 532 2 532 2 537 2 447 2 532 2 537 2 537 2 537 2 539 2 539
-97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97 -97	10 3 1 0.3 1 0.3 1 1 0.3 1 1 0.3 1 1 0 3 1 1 0 3 1 1 0 3 1 1 0 3 1 1 1 1	2.445 0 9/Pa) 602.2 703.2 677.9 909.7 775.7 605.6 624.0 503.9 690.4 500.6 430.3 347.7 450.6 367.2	(pr) 32.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 47.6 50.0 49.7 51.4 53.1 50.0	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 13 16 13 14 16 19 14 16	videa : E ¹ (MPs) 27 372 25 020 24 144 22 403 21 255 19 240 17 367 15 448 13 064 14 077 12 196 10 240 6 395 6 763 6 467	3.5 4.4 6.1 6.6 6.4 6.7 9.5 12.0 14.0 15.2 17.0 18.0 21.7	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109 15 236 13 344 14 416 11 807 9 601 8 014 6 370 6 026	(MPa) 1 051 1 970 2 005 2 392 2 503 2 502 2 622 2 523 3 034 2 700 3 005 2 600 2 501 2 700 2 700	59.9 39.9 39.9 39.9 (Co. 19.5 19.5 19.5 19.5 19.5 19.5 19.5 19.	1 0.3 max: r (Hz) 10 0.3 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.	10.9 11.9 8.1 11.9 8.1 (kPa) 660.1 729.6 675.3 653.2 622.5 690.2 642.3 585.0 586.0 690.2 690.2 690.2 690.3 490.3 490.3 490.3 490.3 490.3 490.3	50.9 52.0 15 15 15 10 29.9 29.2 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.1 41.3 49.2 50.6 49.7 51.3 51.7 51.3 51.7 51.3	14 17 Densité Tensur CV, (%) 30 31 30 29 20 31 29 25 22 15 16 21 25 26 27	233 156 brute : vides : [67] (MPs) 25 963 24 426 20 134 20 133 19 716 17 880 16 305 14 501 11 953 14 001 11 953 6 960 6 390 6 390	41.0 30.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7 5.1 6.6 8.0 8.0 11.3 10.3 10.3 15.8 15.8 15.8 16.1 16.	E1 (MPa) 25 503 24 344 23 040 21 409 20 052 19 500 11 7715 16 119 14 305 13 703 11 674 9 676 6117 0 6 641 7 9 18	153 94 1996 1 990 2 992 2 120 1 800 2 255 2 493 2 459 2 530 2 530
(°C) -19.6 -	0420 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1	2.445 0 6692.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.9 690.7 690.7 690.4 500.0 347.7 420.6 367.2 260.3 367.2 260.3	(pr) 30.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 47.6 50.0 51.2 51.4 53.1 56.9 50.9	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 17 9 11 13 16 13 14 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	Videa : [67] (MPa) 252 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677 12 196 6 763 6 763 6 629 6 467 5 013 3 622	32% 0 35 44 49 6.1 6.6 6.7 9.5 12.0 10.0 14.0 15.0 16.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 035 17 189 15 236 13 344 14 416 11 807 9 861 8 014 6 370 8 180	(MPa) 1 651 1 976 2 065 2 392 2 502 2 602 2 602 2 543 3 034 2 760 3 065 2 501 2 271 2 749	39.9 39.9 39.9 39.9 5prouver Censité: 19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -	1 0.3 max:	10.9 11.9 8.1 8.1 7 (6Pa) 600.1 729.6 675.3 653.2 642.3 585.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 586.0 686.	50.9 52.0 15 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3	14 17 Densité Teneur CV, (%) 30 31 30 29 20 51 29 25 15 16 21 25 22 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25	203 156 brute : videa : [E1] (MPs) 25 920 24 420 23 134 21 574 20 133 19 710 17 590 14 500 12 973 14 001 11 926 6 900 6 5332	41.0 30.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 4.7 5.1 5.2 5.7 5.1 6.0 6.7 9.6 11.3 12.5 13.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15	E1 (MPa) 25 903 24 344 23 903 24 469 20 952 19 503 17 715 16 119 14 303 11 074 9 976 0 170 6 641 7 915 5 969 4 510 3 204	153 94 1 902 1 902 2 190 2 190 2 255 2 493 2 497 2 497
(°C) 198 198 198 198 198 198 198 198 198 198	0(z) 10 3 1 0.3 10 3 1 0.3 11 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.1 0.3 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	2.445 0 6Pa 602.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.9 690.7 690.7 430.3 347.7 450.6 367.2 200.3 109.3 1137.5	(par) 302 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.4 47.6 50.0 49.7 51.4 53.1 56.6 51.9	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 17 9 11 13 13 14 16 16 16 16 17 17 18 17 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18	videa : [67] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677 10 240 6 395 6 763 6 763	0 (°) 35 4.4 4.9 6.1 6.8 6.7 95 12.0 14.0 15.2 17.3 19.0 18.0 24.7 24.7 24.7 29.9	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109 15 236 13 344 14 416 11 807 9 601 6 036 6 036 4 555 3 210 2 296	(MPa) 1 051 1 975 2 095 2 392 2 502 2 602 2 622 2 543 3 034 2 760 2 505 2 606 2 501 2 749 2 400 2 094 1 677 1 321	29.9 29.9 29.9 29.9 Eprouve Cenable: 19.6 19.6 19.6 19.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2	1 0.3 max: remax: r ((tz) 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 1 1 0.3 1 0.3 1 1 0.3	10.9 11.9 8.1 1.1 10.9 8.1 1.1 10.9 8.1 1.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 1	50.9 52.0 15 23.9 29.2 29.2 29.2 30.3 45.4 40.7 40.1 41.3 49.2 49.7 51.3 51.7 51.3 51.7 52.1 53.6	14 17 Densité 17 Tensur CV., (%) 30 30 32 39 25 15 16 21 22 27 26 29 29 25 27 26 29 29 26 29 26 29 26 29 26 29 26 29 26 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	233 156 bnus : videa : [RT] 25 953 24 426 25 1574 20 133 19 716 17 590 14 503 12 973 14 503 11 971 16 305 14 503 10 271 16 966 6 390 4 941 3 609 2 649	41.0 36.8 2.253 3.8% 9 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.8 6.0 6.7 7.2 8.0 11.3 12.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15	176 125 0MPa) 25 003 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500 17 715 10 119 14 365 12 723 13 003 11 074 9 976 6 641 7 916 5 909 4 510 3 204 2 386	153 94 1902 1902 2 196 2 196 2 215 2 490 2 255 2 490 2 257 2 491 2 502 2 491 2 502 2 192 2 193 2
(C) 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6	10 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1 0 3 1	2.445 0 (8Pa) 002.2 703.0 703.2 677.9 939.7 775.7 605.0 624.0 503.9 690.7 609.4 500.0 347.7 450.0 347.0	E (ptr) 30.2 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.2 50.0 51.9 50.0 51.9 50.9 50.9 50.9	Tensur CV, (%) 9 11 10 11 7 9 11 13 16 13 14 16 16 16 20 21 20 23	videa : [67] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 403 24 12 55 19 240 17 367 15 649 13 664 677 12 196 6 763 6 763 6 629 6 407 5 013 5 622 2 650 3736	0 (°) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.6 6.4 6.7 9.5 12.0 14.0 15.2 17.3 27.7 27.5 29.9 39.3 39.9 39.3	27 322 25 543 24 955 22 306 21 107 19 905 17 109 15 230 13 344 14 416 11 807 9 861 8 014 8 370 8 180 6 926 4 555 3 210 2 296 3 192	(MPa) 1 051 1 976 2 995 2 392 2 502 2 502 2 502 2 503 3 034 2 790 3 005 2 501 2 749 2 749 2 400 2 094 1 677 1 321 1 942	39.9 39.9 39.9 39.9 5prouve T (*C) -19.6 -19.6 -19.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2.6 -2	1 0.3 te: mass: F (Hz) 10 0 3 1 0.3 1 10 0.3 1 1	10.9 8.1 1.9 8.1 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1	50.9 52.0 15 29.9 29.2 29.2 29.2 29.2 29.4 40.1 41.3 40.1 41.3 40.1 41.3 50.6 49.7 51.3 51.7 55.0 55.0 55.0 55.0	14 17 Densità 17 Tensur CV. (%) 30 31 30 31 32 32 31 32 31 32 31 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32	233 156 bruss : vides	41.0 36.8 2.253 3.0% 6 (7) 52 4.7 5.7 5.1 6.0 6.0 6.0 7 9.0 11.3 12.5 13.6 10.1 12.5 13.0 10.1 12.5 13.0 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1	E1 (MPa) 25 903 24 344 29 29 903 17 715 18 19 97 18 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 19 97 18 18 19 97 18 18 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19 19	153 94 1 902 1 990 2 992 2 1990 2 1990 2 1990 2 255 2 459 2 459 2 459 2 170 2 170 2 170 2 1990 1 1950 1 195
(°C) 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6	0(z) 10 3 1 0.3 10 3 1 0.3 11 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.1 0.3 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	2.445 0 6Pa 602.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 605.6 624.6 503.9 690.7 690.7 430.3 347.7 450.6 367.2 200.3 109.3 1137.5	(par) 302 29.0 29.1 30.2 44.2 40.3 39.4 40.4 41.4 47.6 50.0 49.7 51.4 53.1 56.6 51.9	Teneur CV, (%) 9 11 10 11 17 9 11 13 13 14 16 16 16 16 17 17 18 17 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18	videa : [67] (MPa) 27 372 25 620 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677 10 240 6 395 6 763 6 763	0 (°) 35 4.4 4.9 6.1 6.8 6.7 95 12.0 14.0 15.2 17.3 19.0 18.0 24.7 24.7 24.7 29.9	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109 15 236 13 344 14 416 11 807 9 601 6 036 6 036 4 555 3 210 2 296	(MPa) 1 051 1 975 2 095 2 392 2 502 2 602 2 622 2 543 3 034 2 760 2 505 2 606 2 501 2 749 2 400 2 094 1 677 1 321	29.9 29.9 29.9 29.9 Eprouve Cenable: 19.6 19.6 19.6 19.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2	1 0.3 max: remax: r ((tz) 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 1 1 0.3 1 0.3 1 1 0.3	10.9 11.9 8.1 1.1 10.9 8.1 1.1 10.9 8.1 1.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 1	50.9 52.0 15 23.9 29.2 29.2 29.2 30.3 45.4 40.7 40.1 41.3 49.2 49.7 51.3 51.7 51.3 51.7 52.1 53.6	14 17 Densité 17 Tensur CV., (%) 30 30 32 39 25 15 16 21 22 27 26 29 29 25 27 26 29 29 26 29 26 29 26 29 26 29 26 29 26 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	233 156 bnus : videa : [RT] 25 953 24 426 25 1574 20 133 19 716 17 590 14 503 12 973 14 503 11 971 16 305 14 503 10 271 16 966 6 390 4 941 3 609 2 649	41.0 36.8 2.253 3.8% 9 (7) 4.2 4.7 5.2 5.7 5.1 6.8 6.0 6.7 7.2 8.0 11.3 12.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15.8 15	176 125 0MPa) 25 003 24 344 23 040 21 469 20 052 19 500 17 715 10 119 14 365 12 723 13 003 11 074 9 976 6 641 7 916 5 909 4 510 3 204 2 386	153 94 1902 1902 2 196 2 196 2 215 2 490 2 255 2 490 2 257 2 491 2 502 2 491 2 502 2 192 2 193 2
(C) 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6 19.6	Max: f (Hz) 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	2.445 0 (6Pa) 802.2 703.6 703.2 677.9 939.7 775.7 685.6 624.8 563.9 690.7 690.4 500.6 430.3 347.7 450.6 109.3 1190.3 149.2 84.2 84.2 84.2 84.2 85.3 86.3 8	E (pr) 30:2 29:0 29:1 30:2 40:3 40:3 40:4 40:4 40:7 51:2 51:4 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50	Tensur CV., (%) 9 11 10 11 17 9 11 13 16 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	videa : [67] (MPa) 27 372 25 020 24 144 22 433 21 255 19 240 17 367 15 449 13 664 14 677 6 763 5 6 252 6 467 3 756 2 2 2 650 2 775 1 599 2 775 1 599 2 775 1 599 2 775 1 599 2 775 1 599 2 775	3.2% 0 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 12.0 10.0 15.2 17.3 19.0 21.7 24.7 27.9 21.7 27.9 21.7 27.9	27 322 25 543 24 955 22 306 21 107 19 205 17 109 15 206 11 4416 11 807 9 801 4 6 370 8 165 3 210 2 290 2 3 192 1 905 1 253 774	(MPa) 1 851 1 951 2 985 2 982 2 503 2 822 2 622 2 523 3 934 2 760 3 985 2 986 2 501 2 271 2 740 2 984 1 677 1 942 1 377 943 930	39.9 39.9 59.9 59.9 6prouve 7 7 19.5 19.5 19.5 19.5 9.6 9.6 9.5 9.5 9.5 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 20.2 20.2 20.2	1 0.3 tes: Test 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 10 2 1 1 1 1	10.9 11.9 6.1 11.0 11.0 11.0 11.0 11.0 11.0 11.0	50.9 52.0 15 20 15 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	14 17 Densité 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17	233 1556 bruss : : : : : : : : : : : : : : : : : :	41.0 30.8 2.363 3.0% 0 (7) 42 4.7 5.1 5.2 5.7 5.1 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10	176 125 116 125 125 125 125 125 125 125 125 125 125	153 94 1 902 1 902 2 120 1 902 2 120 1 906 2 453 2 453 2 453 2 453 2 537 2 537 2 537 2 537 2 537 2 176 3 554 1 151 1 150 1 150 1 150 1 150 1 150 1 150
(C) (C) (P) (P) (P) (P) (P) (P) (P) (P) (P) (P	Max: f (6/2) 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	2.445 0 0.67a) 6.7a) 6.7	r (µr) 30:22 29:8 29:1 30:2 44:2 40:3 39:4 40:4 47:6 50:0 49:7 51:2 51:4 55:1 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0	Tensur CV, (%) 9 11 10 11 17 7 9 11 13 13 13 14 16 16 16 12 20 21 20 16 12 8	Videa : [RT] (MPa) 27 372 25 602 24 144 22 403 24 125 19 240 17 367 15 449 13 064 14 077 12 196 6 467 5 013 3 622 2 650 3 736 2 375 1 599 1 003 647	3.2% 0 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 8.7 12.0 10.0 14.0 18.0 18.0 19.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109 15 206 13 344 14 416 11 807 8 601 6 020 6 020 4 555 3 210 2 296 1 905 1 1905 1 205 1 205	(MPa) 1 051 1 951 1 975 2 005 2 002 2 002 2 022 2 543 3 034 2 700 3 005 2 501 2 503 2 503 2 504 1 700 2 505 2 506 2 501 2 745 2 400 2 501 1 942 1 942 1 942 1 942 1 943 1 943	59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9	1 0.3 tes: mass: F (Hz) 10 0.3 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.	10.9 11.9 11.9 6.1 EB-076-6 6.1 6.1 6.1 6.1 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2	50.9 52.0 15 29.9 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.1 41.3 49.2 51.8 51.7 51.8 52.1 51.8 52.3 51.9 52.3 51.9 51.8 52.3	14 17 Densité 17 Tenser CV. (%) 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30	233 155 bnuts : : : : : : : : : : : : : : : : : : :	41.0 30.8 2.253 3.8% 0 (7) 42 4.7 5.2 5.7 5.1 6.0 6.7 9.6 6.0 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10	176 125 1 (MPs) 25 903 2 149 20 9052 1 9 506 2 1 77 715 1 1 97 1 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1	153 94 1902 1902 2190 2190 2190 2190 2190 2190
(°C) (°C)	Max: 7 (042) 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	2.445 0 602.2 703.6 602.2 703.6 607.9 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 775.7 939.7 939.7 939.7 949.7 959.7	r (pr) 302 29.0 29.0 29.1 40.3 39.4 40.4 40.7 47.0 50.0 51.2 51.2 51.2 51.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50.9	Teneur CV, (%) 9 11 10 10	(MPa) 27 372 25 020 (MPa) 27 372 25 020 21 25 52 14 144 22 433 21 25 52 19 240 17 36 74 15 149 10 240 6 703 3 022 2 375 5 013 3 022 2 375 6 1 023 1 025 1 02	3.2% (°) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 6.7 9.5 12.0 14.0 15.2 17.0 16.0 17.0 16.0 22.7 27.0 28.9 21.3 26.3 26.3 26.3 27.0 28.9 29.3 20.4 20.	27 322 25 543 24 955 22 300 21 107 19 025 17 199 15 236 13 344 14 410 11 801 8 014 6 370 6 020 4 555 3 210 2 296 3 192 1 935 1 253 774 501 1 094	(MPa) 1 651 1 876 2 965 2 992 2 502 2 502 2 502 2 502 2 503 3 034 3 034 2 506 2 271 2 740 2 291 2 740 2 904 1 677 1 921 1 942 1 375 9 306 9 306	39.9 39.9 39.9 Eprouve 7 7 19.6 -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -	1 0.3 tes: mass: F (Hz) 10 0.3 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.1 10 0.0 0.	10.9 11.9 2.445 0 0 60.9 60.9 60.9 60.9 60.9 60.9 60.9	50.9 52.0 115 r (pr) 33.3 29.9 29.2 30.3 31.0 45.4 40.7 45.4 40.1 41.3 50.6 49.7 55.5 50.5 50.8 50.8 50.8 50.8 50.8 50.8	14 17 Denaité 17 17 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18 18	233 156 brute : videa : videa : [57] 6 MPa) 2 134 250 23 134 250 133 157 260 135 157 260 1	41.0 30.8 2.353 3.8% 9 (7) 4.2 4.7 5.1 6.8 8.0 8.7 5.1 13.3 12.5 13.8 10.3 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5 12.5	176 125 125 125 125 125 125 125 125 125 125	153 94 1 902 1 902 1 906 2 120 2 120
	Max: f (6/2) 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 3 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1	2.445 0 0.67a) 6.7a) 6.7	r (µr) 30:22 29:8 29:1 30:2 44:2 40:3 39:4 40:4 47:6 50:0 49:7 51:2 51:4 55:1 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0 50:0	Tensur CV, (%) 9 11 10 11 17 7 9 11 13 13 13 14 16 16 16 12 20 21 20 16 12 8	Videa : [RT] (MPa) 27 372 25 602 24 144 22 403 24 125 19 240 17 367 15 449 13 064 14 077 12 196 6 467 5 013 3 622 2 650 3 736 2 375 1 599 1 003 647	3.2% 0 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 8.7 12.0 10.0 14.0 18.0 18.0 19.0	27 322 25 543 24 055 22 306 21 107 19 005 17 109 15 206 13 344 14 416 11 807 8 601 6 020 6 020 4 555 3 210 2 296 1 905 1 1905 1 205 1 205	(MPa) 1 051 1 951 1 975 2 005 2 002 2 002 2 022 2 543 3 034 2 700 3 005 2 501 2 503 2 503 2 504 1 700 2 505 2 506 2 501 2 745 2 400 2 501 1 942 1 942 1 942 1 942 1 943 1 943	59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9	1 0.3 tes: mass: F (Hz) 10 0.3 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.1 10 0.2 0.	10.9 11.9 11.9 6.1 EB-076-6 6.1 6.1 6.1 6.1 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2	50.9 52.0 15 29.9 29.2 29.2 30.3 31.0 45.4 40.1 41.3 49.2 51.8 51.7 51.8 52.1 51.8 52.3 51.9 52.3 51.9 51.8 52.3	14 17 Densité 17 Tenser CV. (%) 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30	233 155 bnuts : : : : : : : : : : : : : : : : : : :	41.0 30.8 2.253 3.8% 0 (7) 42 4.7 5.2 5.7 5.1 6.0 6.7 9.6 6.0 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10	176 125 1 (MPs) 25 903 2 149 20 9052 1 9 506 2 1 77 715 1 1 97 1 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1	153 94 1902 1902 2190 2190 2190 2190 2190 2190
	7 (9/20) 10 3 1	2.445 0 67a) 6022 703.6 7703.2 677.9 939.7 775.7 775.7 609.4 605.0 624.0 625.0 624.0 625.0 6	(gr) 30.2 29.0 30.2 29.0 30.2 29.1 30.2 29.1 30.2 40.3 39.4 41.2 47.6 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50	Tenser CV., (%) 9 11 10 11 17 7 9 11 13 16 13 13 14 16 16 12 20 21 16 12 2 8 8 8 8 8	(Kina): (Kina)	3.2% 0 (P) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.0 6.4 6.7 9.5 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 20.7 20.7 20.7 20.7 20.7 20.3 20.4	27 302 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 544 545 545 545 545 545 545 545 54	(MPa)	59.9 59.9 59.9 5prouver 7 (°C) -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -	1 0.3 mex: F 0 0 20 10 0 3 1 1	10.9 11.9 8.1 EB-078-2.445 or 6/Pai 80.1 1729-6 60.1 729-6 60.1 2	50.9 52.0 52.0 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 2	144 17 Densità 17 Tensur 17 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	233 256 257	41.0 30.8 2.363 3.0% (7) 42 2.57 5.1 6.0 6.7 9.6 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3	176 (MPa) (MPa) (125 MPa) (MPa) (MPa	153 94 1 902 1 996 2 199 2 199
	10 0.3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 1 0.3 0.1 10 0.3 1 0.3 0.1 10 0.3 1 0.3 0.1 10 0.1 10 0.3 0.1 10 0.1 10 0.3 0.1 10 0.1 10 0.1 10	2.445 0 (6Pa) 6022 677.9 605.2 677.9 605.6 624.0 624.0 626.0	(gr) 3022 2983 302 442 2981 302 442 47.6 50.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51.6 51	Tenser CV, (%) 9 111 10 111 17 9 111 13 13 13 13 13 13 13 14 16 18 18 19 11 12 20 16 12 12 20 16 12 8 12 9 11	(Within 1 (1) (Within 1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (3.2% 9 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 6.7 10.0 15.2 17.3 10.0 15.2 17.3 20.7 20.9 20.7 20.9 20.7 20.9 20.7 20.9	27 302 5 543 5 54 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	0MPa) 1 651 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9	1 0.3 mes: mess: f 10 0.3 1 0.3 0.1 10 0.1 10 0.3 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0.1 10 0	10.9 11.9 11.9 6.1 EB-076-6 6.1 6.1 6.1 6.1 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2 6.2	50.9 52.0 52.0 52.0 33.3 32.2 32.3 31.0 45.4 40.1 32.4 40.2 50.2 50.3 51.7 51.7 51.5 51.9 52.3 51.9 52.3 51.9 52.3 52.3 52.3 52.4 52.4 52.5 53.5 54.5 54.5 55.5 56.5 56.5 56.5 56.5 56	144 17 Densità 17 Tensur 19 10 10 10 10 11 10 11 10 11 11 11 11 11	233 156 brute : riddes: ri	41.0 20.8 2.353 3.0% 4.7 4.7 5.2 5.7 5.1 6.0 6.7 9.0 10.3 1	176 125 E1 (MPs) 24 344 23 940 25 25 833 24 344 23 940 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25	153 94 1902 1902 2 192 2 193 2 193 1
	7 (9/20) 10 3 1	2.445 0 67a) 6022 703.6 7703.2 677.9 939.7 775.7 775.7 609.4 605.0 624.0 625.0 624.0 625.0 6	(gr) 30.2 29.0 30.2 29.0 30.2 29.1 30.2 29.1 30.2 40.3 39.4 41.2 47.6 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50	Tenser CV., (%) 9 11 10 11 17 7 9 11 13 16 13 13 14 16 16 12 20 21 16 12 2 8 8 8 8 8	(Kina): (Kina)	3.2% 0 (P) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.0 6.4 6.7 9.5 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 20.7 20.7 20.7 20.7 20.7 20.3 20.4	27 302 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 525 543 544 545 545 545 545 545 545 545 54	(MPa)	59.9 59.9 59.9 5prouver 7 (°C) -19.6 -19.6 -19.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -9.6 -	1 0.3 mex: F 0 0 20 10 0 3 1 1	10.9 11.9 8.1 EB-078-2.445 or 6/Pai 80.1 1729-6 60.1 729-6 60.1 2	50.9 52.0 52.0 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 20.3 2	144 17 Densità 17 Tensur 17 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	233 256 257	41.0 30.8 2.363 3.0% (7) 42 2.57 5.1 6.0 6.7 9.6 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3 10.3	176 (MPa) (MPa) (125 MPa) (MPa) (MPa	153 94 1 902 1 996 2 199 2 199
T (**C) -19.6 -19.	(0/2) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10) (10	2.445 0 (602.2 0 (602.2 0 (703.2 0 (703.6 0 (703.2 0 (703.6 0 (703	(ar) 30.2 29.5 30.2 29.1 30.2 44.2 40.3 36.4 40.4 41.7 50.0 50.0 51.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50.9 50	Tenser CV. (%) 9 111 10 111 17 9 111 13 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15	victors: [67]	3.2% 9 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 6.7 10.0 15.2 17.3 18.6 19.6 18.6 22.7	27 302 543 545 545 545 545 545 545 545 545 545	(MPa) (MPa) (1651 1570 1570 1570 1570 1570 1570 1570 15	59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9 59.9	1 0.3 mass: mass: f (Hz) 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 1 1 0.3 0.1 10 0.3 0	10.9 11.9 11.9 6.1 EB-078-6 2.445 0 679-0 660.1 660.2 660.2 660.2 660.2 660.2 660.3 660.2 660.3	50.9 52.0 15 (pr) 20.3 20.2 20.2 20.3 20.3 45.4 40.1 40.1 40.1 51.0 51	144 17 Densità 17 Tensur 20 20 20 20 20 21 15 22 25 22 20 20 10 17 13 10 14 10 10 14 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	233 156 bruse : videa : Videa : Videa : E7	41.0 30.8 2.353 3.8% 0 (7) 4.2 5.2 5.7 5.1 5.5 1.0 5.0 6.7 9.6 1.1 3.1 12.5 12.8 12.8 24.1 27.4 27.5 22.4 12.7 5.3 22.7 5.3	176 125 1 (MPs) 2 3 344 2 3 340 2 3 346 1 7 715 1 6 119 2 9 776 6 641 1 7 9 17 9 18 5 5 669 2 3 364 2 4 60 7 1 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 6 64 1 0 0 0 0 6 64 1 0 0 0 0 6 64 1 0 0 0 0 0 0 6 64 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	153 94 1 902 1 902 2 902 2 120 1 500 2 459 2 451 2 532 2 451 2 532 2 451 2 532 2 557 2 467 1 506 1 150 1 150
(C) 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 119.0 110.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 1	(012) (10 3 1 0 3 1 1 0 3 2 1 1 0 3 2 1 1 0 3 2 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 0 3 3 1 1 1 1	2.445 0 (6Pa) 60522 677.9 605.2 677.9 209.7 775.7 605.6 626.9	(gar) 30.2 29.0 30.2 29.1 30.2 40.3 30.4 40.4 40.4 41.2 50.0 51.0 50.0 51.0 50.0	Tenser CV. (%) 9 11 10 10 11 17 9 11 13 13 13 14 14 16 18 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	victors: (MPs) (MP	3.2% 9 (7) 3.5 4.4 4.9 6.1 6.8 6.4 7.7 10.0	27 302 5 543 5 54 5 55 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	(MPa) (MPa) (1651 1 1651 1 1670 2 1665 2 1692 2 169	599 9 599 599 599 6 7 7 (**C) 549 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	1 0.3	10.9 11.9 11.9 5.1 EB-078-5 0 6.7 6.9 6.0 6.7 6.9 6.0 6.7 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0	50.9 52.0 52.0 52.0 52.0 52.0 52.2 52.2 52.3 54.4 52.3 54.7 54.3 54.7 54.6 52.7 54.8 52.9 54.8 55.8 52.9 54.8 55.8	14 17 Densité 17 CV, (%) 20 20 20 22 25 22 26 29 20 10 17 13 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	233 brute : iddes: inides: inides: inides: inides: iddes:	41.0 20.8 2.353 3.0% 4.7 5.7 5.1 6.0 6.7 6.7 5.1 6.0 6.7 11.3 10	176 125 125 125 125 125 125 125 125 125 125	153 94 1902 1990 2 1992 2 199 2 199 1 199

Section 3-GB20 (200 mm) au SERUL

Transports Page: 1 de 2 RAPPORTS D'ESSAIS - ENROBÉS Québec ## ESSAIS EN TRACTION-COMPRESSION DIRECTE Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec G1P9W8 ÉCHANTILLON EXPÉDITEUR ET DISTRIBUTION Mode d'échantillonnage : Jean-Pascal Bilodeau, UL Soumis par: Carottes de 150 mm de diamètre Type d'échantilion : Fritz Prophète, SC GB-20 AM-059-14 Type d'enrobé : Numéro de dossier interne : Couche de base Usage: Date de réception : PRÉLÈVEMENT No. de fiche d'échantillonnage : 761241 - 761242 - 761243 Entrepreneur : Route/trong/sect. : C-6 - C-7 - C-8 Planche d'essai SERUL - Sect. 3 Numéro d'échantillon : Steeve Gagnon, MTQ Chalnege/décalage 2014-10-09 00:00 Vois/emplacement dans la voie : Municipelité : Date/Heure: Lieu: Sur la route Lac-Jacques-Cartier Source de granulats Source de bitume : Classe de bitume : PG 58_34 130 - Inter-Cité Construction Centrale d'enrobage : Formule d'enrobé : Type d'essai à réaliser : Module complexe Teneur en bitume : 4.50% Remarque: Ceroties C-8, C-7 et C-8 de la Section 3 Couche de base LC 28-700 Détermination du module complexe des enrobés Carottage sur la route 135 mm Mode de préparation : Éprouvette : EB-078-15 EB-079-15 EB-080-15 2.473 Hauteur des éprouvettes Diamètre des éprouvettes : 75 MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPw) 7.93E-04 0.174 0.549 0.218 -0.152MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG JE¶ (MPa) 0.543 4.983 -1.934 -0.395 -0.144 3.61E-04 Sept Total Christian Larochelle, 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

٠,	oports Ou sá	bec	C3 E3		PPORTS (IS IN TRA	стом	COMPRE									Page :	2 de 2
	Que	Deci	3 63			OPERCIT			Éprouve Densité		EB-078- 2.473	15	Teneur	brute :	2.340 5.1%		
									T	T T	0	E	CV,	E'	0.11%	E1	62
									(20)	(142)	(kPa)	(per)	(%)	(MPs)	O	(MPs)	(MPs)
									-19.6	10	702.6	30.6	29	22 967	2.8	22 939	1 137
MODELE	HUET-	SAYEGH	DE MO	DULE OF	OMPLEXE	E. (M	Pa)		-19.5 -19.5	3	645.3	29.6	29	21 777	4.2	21 755 20 853	1539
					-	1.4	10	140	-19.5	0.3	580.7	29.5	27	19 865	0.4	19 741	2 214
$E^{\phi} - E$	5. + 	- 01-	1-4	/. \													
	- 1	+ <i>δ\μω</i>	r) - +	$(i\omega\tau)$			og E1 =	0.048	4.7	10	784.0	41.0	36	19 158	5.3	19 076	1771
$\tau - a_{\tau}$	- T_					RMSE I R ³ log E	og E2 =		-9.7	3	700.0	39.7	36	17 646	6.5 7.4	17 531	2 009
log a,	6	r r)	+ = 6	r r	\z	R ² log I	2 -	1.00	-9.7 -9.7	0.3	642.7 596.4	39.4 40.2	37 37	16 297	0.5	16 161	2 097
ug u ₇	-4,0	-1,)	1 42 (1	-4,	,			103	-9.7	0.1	550.0	41.0	37	13 437	7.9	13 310	1 040
									0.3	10	734.2	51.7	26	14 194	7.9	14 059	1952
E.,	E.	2.093	0.174	0.549	0.216	-0.152		8 ₃ 95-04	0.3	3	514.4 520.4	49.2	27 27	12 499 11 050	10.4	12 292	2 267
0.1	30 300	2.093	U.174	0.549	0.210	40.152	7.80	26-04	0.3	0.3	479.1	50.4	26	9 509	13.2	9 259	2 105
									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	9708	142	9.412	2 300
									10.1	3	362.2	50.1	15	7 633	17.3	7 478	2 332
woodus	WEEDS	AK DOM	00005	DYNAMA	QUE, LO	G IPS 4	MPw)		10.1	0.3	317.3	49.9	16	6 354	19.5	5 990 4 553	2 119
	-		- DOLL			- 1-10			10.1	0.1	180.6	51.6	16	3 752	25.3	3 393	1 602
$\log E^{*}$	-5	1+e	α	_		Т, •	10	10	20.1	10	262.1	49.7	15	5 276	23.9	4 825	2 135
		$1+e^{i}$	# + Ting /	F1		MITTER	og E° =	0.000	20.1	3	171.7	45.5 52.2	15	3 773	27.9	2 253	1 703
$f_r - a$						R'iog ji		1.00	20.1	0.3	92.3	52.0	14	1776	30.0	1 436	1 045
log a	-06	$r-T_r$	+06	r - r	12			103	20.1	0.1	01.5	51.6	12	1 191	39.3	921	755
ug a _r	-4,0	-1,1	T 42 0			- mar		0.3	29.5	10	119.6	53.6	13	2 233	36.6	1787	1 339
					-			27 600	29.8	3	45.9	46.3 53.4	11	1 395	40.8	1 058	911 597
8	•	5	7	a,			-		29.9	0.3	26.3	52.5	7	501	40.0	340	360
-0543	4.903	-1.934	-0.395	-0.144	3.010	-04	_		30.1	0.1	16.0	52.1	5	307	40.6	211	223
									40.2	10	20.0	42.0 51.1	10	734 391	48.2 50.3	409 250	547 301
									40.3	- 7	11.9	53.4	10	223	49.5	144	170
									40.4	0.3	6.7	52.0	11	129	49.7	88	94
									40.4	0.1	4.0	51.9	13	89	47.4	60	65
Eprouvet		EB-079-1	5		brute :				Eprouve		EB-080-	15	Densité		2.323		
Densité n	max:	2.473		Teneur CV.	vides:	6.3%	101	E2	Densité	max:	2.473		Teneur CV.	WORK:	0.1%	E4	62
(90)	(9120)	(kPa)	(ur)	(%)	(MPa)	Ö	(MPs)	(MPa)	(90)	(912)	(kPa)	(par)	(%)	(MPs)	Ö	(MPn)	(MPs)
-19.7	10	732.2	29.6	17	24 771	2.7	24744	1 100	-19.6	10	721.9	30.4	27	23 739	3.2	23 703	1 316
-19.7	3	650.5	29.5	17	23 606	2.8	23 578		-19.5 -19.7	3	620.1	29.5	26 27	22 627	3.7 4.7	22 501	1 447
-19.7 -19.7	0.3	634.7	20.9	17	21 270	43	21 205		-19.7	0.3	611.0	20.1	27	20 353	5.0	20 276	1770
				-					-19.7	0.1	588.5	30.6	27	19 237	5.2	19 157	1747
-9.8	10	027.0	40.3		20 517	5.7	20 416		-9.7	10	783.6	40.9	30	19 105	5.7	19 071	1904
-9.8	3	747.7	39.5	8	18 916	63	18 802		-9.7 -9.7	3	642.4	39.7	29	17 592	6.8 7.5	17 470	2 066
-9.5	0.3	631.4	40.1	7	15 727	8.2	15 588		-9.7	0.3	580.6	40.5	27	14 005	0.5	14 505	2 107
-9.0	0.1	503.1	41.1	÷	14 191	0.4	14 040		-9.7	0.1	540.7	40.9	26	13 200	0.1	13 157	1 000
0.4	10	759.5	51.2	13	14 826	9.4	14 625	2 433	0.4	10	729.1	52.1	26	13 904	9.3	13 790	2 271
	3	633.5 540.1	48.9 47.5	13	12 956	11.2	12710		0.4	3	514.3	49.3	27 27	12 197	11.2	11 903	2 379
0.4		491.8	47.5 50.7	12	9701	12.2	9 430	2 412	0.4	0.3	459.0	40.1 50.6	27	9 090	11.8	8 828	2 103
0.4	0.3		51.3	10	0.244	15.9	7 930	2 257	0.4	0.1	396.3	51.2	25	7 739	15.7	7.450	2 094
0.4		423.3				13.9	9 019	2.430		10	440.1	40.0	17	9 504	14.5	9 189	2 429
0.4 0.4 0.4	0.3 0.1 10	453.2	44.0		10 116				10.1					7 640	17.3		2 266
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1	0.3 0.1 10 3	453.2 409.7	44.0 50.2		0 159	16.9	7 000	2 376	10.1	3	385.7	50.5	17			7 296	2.450
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1	0.3 0.1 10 3	453.2 409.7 330.2	44.0 50.2 49.0	8	0 159 0 050	18.4	7 006 6 277	2 376 2 213	10.1	1	309.3	49.9	16	6 196	19.8	5-831	2 102
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1	0.3 0.1 10 3	453.2 409.7	44.0 50.2		0 159	16.9	7 000	2 376	10.1	3							2 102 1 834 1 545
0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1	453.2 409.7 330.2 264.2 203.7 250.2	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0	8 9 11	0 159 6 050 5 153 3 940 5 034	16.9 19.4 21.6 24.4 22.7	7 606 6 277 4 704 3 593 5 197	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1	3 1 03 01	309.3 245.3 188.5 254.3	49.9 51.3 51.8 50.3	16 16 16	6 190 4 700 3 642 5 000	19.8 22.6 25.1 24.5	5 831 4 415 3 298 4 802	1 834 1 545 2 102
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3	453.2 409.7 530.2 264.2 203.7 250.2 174.3	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9	8 9 11 11	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.6	7 806 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 601	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1	3 1 0.3 0.1 10 3	309.3 245.3 188.5 254.3 154.0	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3	16 16 16 17 10	6 190 4 700 3 642 5 060 3 642	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224	1 634 1 545 2 102 1 693
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3	453.2 409.7 330.2 264.2 203.7 256.2 174.3 149.6	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9 51.9	8 9 11 11 12 14	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001 2 004	18.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.6 30.9	7 808 6 277 4 784 3 593 5 197 3 599 2 475	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 601 1 462	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1	3 1 0.3 0.1 10 3	309.3 245.3 188.5 254.3 154.0 133.1	49.9 51.3 51.6 50.3 42.3 51.6	16 16 16 17 16 19	6 190 4 700 3 642 5 000 3 642 2 567	19.5 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224 2 185	1 634 1 545 2 102 1 693 1 347
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3	453.2 409.7 530.2 264.2 203.7 250.2 174.3	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9	8 9 11 11	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.6	7 806 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 601	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1	3 1 0.3 0.1 10 3	309.3 245.3 188.5 254.3 154.0	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3	16 16 16 17 10	6 190 4 700 3 642 5 060 3 642	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224	1 634 1 545 2 102 1 693
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	453.2 409.7 530.2 264.2 203.7 256.2 174.3 149.6 100.2	44.0 50.2 49.0 51.3 51.6 45.0 42.9 51.9	8 9 11 11 12 14 16	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001 2 004 1 902	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.0 30.9 34.4	7 000 6 277 4 704 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 681 1 482 1 093	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 133.1 60.0	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.8	16 16 16 17 18 19	6 196 4 700 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224 2 185 1 395	1 634 1 545 2 102 1 693 1 347 962
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2	0.5 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.5 0.1 10 3	455.2 409.7 230.2 264.2 203.7 256.2 174.3 149.6 100.2 67.2 122.7 66.7	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9 51.9 51.9 51.5	8 9 11 12 14 10 18 9 11	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001 2 004 1 932 1 305 2 344 1 404	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.0 30.9 34.4 37.7 35.0 39.1	7 606 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 601 1 402 1 093 796 1 370 924	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 130.1 60.6 59.2 111.1 63.1	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.8 51.5 53.3 40.8	16 16 17 18 19 10 17 17	6 196 4 760 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 38.0 39.2	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224 2 185 1 395 910 1 684 1 001	1 834 1 545 2 102 1 693 1 347 992 700 1 225 616
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2 20.2	0.5 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1	453.2 409.7 530.2 264.2 203.7 256.2 174.3 149.6 100.2 67.2 122.7 66.7 48.1	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9 51.9 51.9 51.5 52.3 45.0 52.9	8 9 11 12 14 10 10 10 10 11 11 11	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001 2 004 1 902 1 305 2 344 1 464 900	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.6 30.9 34.4 37.7 36.0 39.1 40.3	7 006 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136 672	2 376 2 213 1 915 1 630 2 178 1 601 1 402 1 093 790 1 370 924 612	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 130.1 60.6 59.2 111.1 63.1 43.2	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.5 51.5 53.3 40.8 53.1	16 16 17 18 19 10 17 17 17 16 15	6 196 4 700 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291 612	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 39.2 42.3	5 831 4 415 3 298 4 602 3 224 2 185 1 395 910 1 664 1 001 601	1 034 1 545 2 102 1 093 1 347 992 700 1 225 616 546
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2	0.5 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.5 0.1 10 3	455.2 409.7 230.2 264.2 203.7 256.2 174.3 149.6 100.2 67.2 122.7 66.7	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 42.9 51.9 51.9 51.5	8 9 11 12 14 10 18 9 11	0 159 0 050 5 153 3 940 5 034 4 001 2 004 1 932 1 305 2 344 1 404	16.9 19.4 21.0 24.4 22.7 27.0 30.9 34.4 37.7 35.0 39.1	7 606 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136	2 576 2 213 1 915 1 630 2 176 1 681 1 462 1 093 790 1 370 924 612 380	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 130.1 60.6 59.2 111.1 63.1	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.8 51.5 53.3 40.8	16 16 17 18 19 10 17 17	6 196 4 760 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 38.0 39.2	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224 2 185 1 395 910 1 684 1 001	1 634 1 545 2 102 1 693 1 347 992 700 1 225 616 546 236
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 10.	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1	453.2 409.7 330.2 264.2 205.7 256.2 174.3 100.2 67.2 122.7 66.7 46.1 26.3 17.7 42.4	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 45.0 51.9 51.5 52.3 45.0 52.9 52.4 52.0	8 8 9 11 11 12 14 16 18 9 11 12 16 9	6 159 6 656 5 153 3 946 5 634 4 001 2 654 1 932 1 305 2 344 1 464 900 540 340	16.9 19.4 21.6 24.4 22.7 27.6 30.9 34.4 37.7 35.0 39.1 40.3 40.4 40.4	7 806 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136 672 363 247	2 376 2 213 1 915 1 630 2 178 1 601 1 402 1 093 790 1 370 924 612 300 233 613	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 10 03 01 10 03 01 10 03 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 120.1 60.6 59.2 111.1 63.1 63.2 25.7 16.3	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.5 51.5 53.3 40.8 53.1 52.5 51.9	10 10 10 17 10 19 10 17 17 17 16 15 16 19	6 190 4 760 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291 612 469 313 713	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 38.0 39.2 42.3 48.0 48.0	5 831 4 415 3 298 4 802 2 185 1 395 910 1 684 1 001 601 358 218 477	1 634 1 545 2 102 1 693 1 347 992 700 1 225 616 546 336 226
0.4 0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 3 0.1 10 0.3 0.1 10 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3	453.2 409.7 330.2 264.2 203.7 256.2 174.9 100.2 67.2 122.7 66.7 46.1 26.3 17.7 42.4 27.7	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 42.9 51.9 51.5 52.3 45.0 52.9 52.9 52.0 60.1	6 6 9 111 112 114 116 118 9 9 9	0 159 0 056 5 153 3 940 5 034 4 001 1 932 1 305 2 344 1 404 900 540 340 350 401	16.9 19.4 21.0 20.4 22.7 27.6 30.9 34.4 37.7 35.0 39.1 40.3 40.4 40.2 47.7	7 806 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136 672 3 63 2 47 5 68 3 10	2 376 2 213 1 915 1 630 2 176 1 630 1 1402 1 093 790 1 370 924 612 330 233 613 341	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 03 01 03 01 03 04 04 05 05 05 05 05 05 05 05 05 05 05 05 05	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 120.1 60.6 59.2 111.1 63.1 63.2 25.7 16.3 10.9	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.8 51.5 53.3 40.8 53.1 52.5 51.9 65.0 40.2	10 10 10 17 10 19 10 17 17 17 10 15 10 19	6 190 4 700 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291 612 469 313 713 392	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 38.0 39.2 42.3 48.0 48.0 50.8	5 831 4 415 3 298 4 802 3 224 2 185 1 385 910 1 684 1 001 801 356 218 477 247	1 034 1 545 2 102 1 693 1 347 992 700 1 225 616 546 336 226 529 304
0.4 0.4 10.1 10.1 10.1 10.1 20.2 20.2 20.2 20.2	0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 1 0.3 0.1 10 3 0.1	453.2 409.7 330.2 264.2 205.7 256.2 174.3 100.2 67.2 122.7 66.7 46.1 26.3 17.7 42.4	44.0 50.2 49.0 51.3 51.0 45.0 45.0 51.9 51.5 52.3 45.0 52.9 52.4 52.0	8 8 9 11 11 12 14 16 18 9 11 12 16 9	6 159 6 656 5 153 3 946 5 634 4 001 2 654 1 932 1 305 2 344 1 464 900 540 340	16.9 19.4 21.6 24.4 22.7 27.6 30.9 34.4 37.7 35.0 39.1 40.3 40.4 40.4	7 806 6 277 4 764 3 593 5 197 3 599 2 475 1 594 1 032 1 902 1 136 672 363 247	2 376 2 213 1 915 1 630 2 178 1 601 1 402 1 093 790 1 370 924 612 300 233 613	10.1 10.1 10.1 10.1 20.1 20.1 20.1 20.1	3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 1 03 01 10 3 10 03 01 10 03 01 10 03 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	309.3 245.3 180.5 254.3 154.0 120.1 60.6 59.2 111.1 63.1 63.2 25.7 16.3	49.9 51.3 51.8 50.3 42.3 51.8 51.5 51.5 53.3 40.8 53.1 52.5 51.9	10 10 10 17 10 19 10 17 17 17 16 15 16 19	6 190 4 760 3 642 5 060 3 642 2 567 1 711 1 149 2 062 1 291 612 469 313 713	19.8 22.6 25.1 24.5 27.7 31.7 35.4 37.6 38.0 39.2 42.3 48.0 48.0	5 831 4 415 3 298 4 802 2 185 1 395 910 1 684 1 001 601 358 218 477	1 634 1 545 2 102 1 693 1 347 992 700 1 225 616 546 336 226

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

Ministère des Transports

Québec sa su méthodel.c 26.700
Québec sa su détermination du module domn, sor des enhorses

Projet: AM-055-14

Client: Jean-Pascal Bilodeau, Chaire (3C

Type orrobé : HH-10C Type blume : PG 58-28

Teneur bitume: 5,3% Teneur vides: 3,2%

Source granulats : Source bitume :

Source enrobé : Carottes Cuve 9C

Ajout :

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

$E^* = E + \frac{E E_a}{-E_a}$	T,+
$E^{\tau} = E_a + \frac{1}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-k}}$	PMSE Id
$\tau = a_T \cdot \tau_o$	RMSE to RF log E

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

RMSE log E2 = 0,062 RF log E1 = 0,99 RF log E2 = 0,99 64

E.	E.	δ	k	h	5,	a,	a,	
17,5	36 500	2,095	0,189	0,532	0,004	-0,136	9,29E-04	

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG JP] (MRs)

$$\begin{split} \log \left| E^{*0} \right| &= \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta - \gamma) \otimes_2 f_*)}} \\ f_r &= a_t \cdot f \\ \log a_r &= a_1 (T - T_r) + a_2 (T - T_r)^2 \\ \frac{\Gamma_*}{\xi_{\rm tot}} &= \frac{10^{\circ} {\rm C}}{200} \\ \frac{\Gamma_*}{\xi_{\rm tot}} &= \frac{21.1}{26.700} \end{split}$$

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

Echantil Teneur		3.2%	14	0.00	brute :	2,384		
T	1	g	. c	CV.	FI	0	E1	F2
(50)	(Hz)	(kPair	(98)	(%)	(MPa)	(9)	(MPa)	(MPa
-18,3	10	882,6	32,7	16	26 963	6,8	26 763	3190
-18,3	3	748,1	29,8	17	25 075	6,4	24 919	2794
-18,3	1	684,0	29,2	16	23 432	6,0	23 303	2 483
-18,3	0,3	646,8	30,0	16	21 591	6,7	21 442	2 5 2 9
-18.4	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	18 851	10,5	18 338	3 414
-9,1	3	651,0	39,4	17	16 538	10,9	16 242	3117
-9,1	0,3	574,2	40.4	15	14 203	12,8	13 852	3136
-9,0	0,1	498,5	41.1	15	12 130	15,3	11 700	3199
1.3	10	608,0	48,3	13	12.597	17,8	11 997	3 842
13	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 9 8 7
1.3	0,3	306,8	51,6	10	5 943	25,2	5 379	2 5 2 7
1.3	0,1	225,3	51,7	8	4 357	27,2	3 877	1 989
11,1	10	336,0	53.2	11	6.316	28,7	5.540	3 034
11,1	3	253,7	59.2	10	4 289	32,8	3 605	2 324
11,1	1.	155,0	52,9	8	2 931	35,6	2.384	1 708
11,1	0,3	94.9	52,2	8	1 816	39,3	1 404	1 152
11.1	0,1	58,7	51,8	5	1 134	42,5	837	765
20.2	10	119,9	48,6	3	2 467	41,4	1 851	1 630
20,3	4	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	963	44.7	685	577
29.6	3	33.0	61,5	2	536	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	29,5	156	89
39.9	10	20,4	52,8	7	386	40,9	292	253
39.9	3	13.5	51,6	6	262	29,5	228	130
39.9	1	11.0	50,1	6	219	19,5	205	73

hantilb	on:	⊞-035	14		brute :	2,382		
neur y	ides :	3,2%		Densite		2,462		-5200
T	1	σ	E)	OV.	E		E1	E2
*C):	f(tz)	(kPa)	(00)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)
18,6	10	859,7	33,0	23	25 038	7,2	25 829	3 291
18,6	3	730,2	30,1	24	24 264	6,1	24 125	2 594
18,6	1	666,4	29,5	23	22 628	6,0	22 504	2 368
18,8	0.3	621.4	30,0	23	20 736	7,3	20 567	2 631
18,6	0,1	583,1	30,6	23	19 053	8,5	18 845	2 809
8,4	10	884,5	44,2	15	19,998	11,0	19 832	3 808
8,4	3	710,4	40,2	18	17 659	10,9	17 342	3 331
8,4	1	614,2	39,3	18	15 618	11,1	15 325	3,014
8,4	0,3	540,5	40,5	18	13 382	13,2	13 010	3 048
8,4	0,1	465.3	41,2	15	11 288	15,5	10.875	3 023
0,9.	10	602.0	48,4	4	12 450	17,6	11 868	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	5 994	24,5	5 454	2 487
0,9	0,1	229,9	51,7	3	4 444	27,9	3 926	2 081
1.2	10	319.9	52,5	7	8 093	29.5	5 302	3 003
12	3	245,2	59,4	6	4 129	31,9	3 504	2 184
1,2	1	148.5	52,7	4	2.819	35,7	2 290	1 644
1,2	0.3	.92,1	52.1	3	1.786	39,5	1 362	1.123
1,2	0,1	57,6	51.8	2	1113	41,3	835	735
0,1	10	125.0	50.9	6	2 457	41.4	1 843	1 625
0,1	1	44,9	52.2	2	859	45.9	597	617
0,1	0.3	25,6	51.7	3	496	44.0	357	344
0,1	0.1	15,8	51,5	. 5	306	45,5	214	218
9,8	-10	45,2	61,1	4	.740	52.4	451	587
9,5	3	26,5	57.9	5	390	50,3	249	300
9,5	1	12,2	53.0	5	231	45,8	161	156
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	66	63
8,5	10	14,9	47,2	- 1	316	48,4	210	237
8,5	3	10,6	57.1	2	186	40,9	141	122
8,5	1	7,2	52,8	3	136	37,1	108	82
8,5	0.3	5,4	52,3	5	103	20,0	96	35

Note: Enrobé de surface

Réalisé par :

Bruno Auger, tech. spec. Emmanuel F.Charland Stagiane - Supervisé par : Maxime Laplante-Boivin, ing. jr.

10 juilet 2014 Date : 11 juillet 2014 Date:

Date:

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

11 juillet 2014

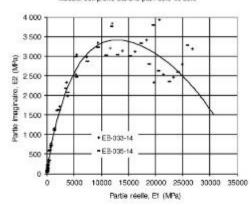
Ministère des Transports Québec : Méthode LC 26-700 MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : MM-065-14 Type enrobé : MB-10C Client : Jean-Pascal Biodeau, Chaire ISC Type bitume : PG 58-28 Note : Enrobé de surface

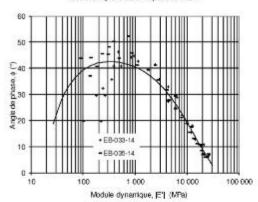
Teneur bitume: *5,3% Source enrobé: Carottes Cuve i3C

Teneur vides: 3,2% Ajout:

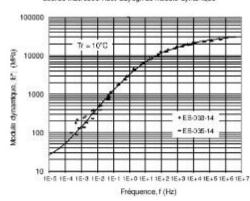




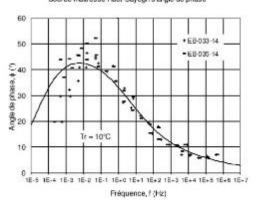
Module complexe dans l'espace de Black



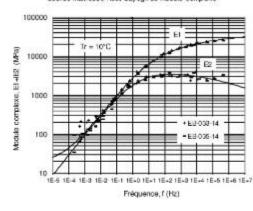
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



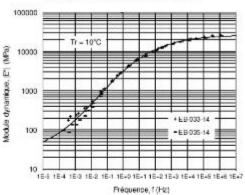
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witozak de module dynamique



Ministère des Transports

Pansports

Québec so so détermination du module complexe des enrosés

Projet: AM-055-14 Client: Jean-Pascal Biodeau, Chaire BC

Type enrobé : EB-10C Type blume : PG 58-28 Teneur bitume: 5,3% Source granulats : Source enrobé : Carottes Cuve I3C

0,99

1,16E-03

Teneur vides: 3.4% Source bitume : Ajout:

FF log E2 =

MODÈLE HUET SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E' (MPa)

$E^* = E_o + \frac{E_{\infty} - E_o}{1 + \delta (i\omega \tau)^{-k} + (i\omega \tau)^{-k}}$ PMSE log E1 = 0,084 HMSE log E2 = 0,070 F8 log E1 = 0,99

 $\tau = a_I \cdot \tau_a$ $\log a_r = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$

67 $\mathbf{n} =$ E, E, 5 k h t, a, 62,9 36,700 2,449 0,195 0,567 0,006 -0,137

MODELE MITCZAK	JE MODULE DYNAMIQUE	LOG P (MPs)
----------------	---------------------	-------------

 $\log |E|^{\frac{2}{3}} = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}}$ 10 °C RMSE log |E*| = 0,053 $f_r = a_t \cdot f$ 1,00 H' log [E'] = 67 $\log a_r = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)$ 52,5 E ... -24 600

δ α β γ a, 1,720 2,671 -0,725 -0,633 -0,148 a₁ 1,10E-03

Echantilon:	IB-034-14	Densité brute :	2,377
Teneur vides :	3.5%	Densité max :	2,462

Teneur	vides :	3,5%		Densite	é max :	2,462		
T	f	σ	E	CV.	E)	0	E1	E2
(°C)	(Hz)	(kPa)	(00)	(%)	(MPa)	(*)	(MPa)	(MPa)
-18,6	10	866,7	32,8	- 11	26 418	7,2	26 208	3 322
-18,6	3	735,1	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	596,0	30,8	12	19 343	8,1	19 152	2712
-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	16,1	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	5 480	2 5 1 4
1,3	0,1	231,6	51,6	11	4.485	27.7	3 971	2 085
31,1	10	330,0	53,0	15	6 226	29,6	5 4 1 4	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	2 891	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	8	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

Öchantil Teneur		IB-036-	14		è brute :	2,381		
T	1	0	8	CV,	E.		E1	E2
(°C)	(Hz)	(kPa)	(sup)	(%)	(MPa)	(2)	(MPa)	(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	2500
-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	19 464		19 268	2757
-8.6	10	881,3	43.9	24	20 090	10,6	19 750	
-8.6	3	723.3	40.7	25	17 771	10.4	17 481	
-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	13 596		13 267	2970
-8.6	0.1	481.8	41.4	21	11 641	14,5	11 272	
0.9	10	636,8	48.9	15	13 029	17,3	12 436	3 882
0.9	3	555.5	52.6	15	10 568		10 086	3 158
0.9	1	434.5	50.8	14	8 559	20.0	8 045	
0.9	0.3	338.6	51.5	12	6 580	23.0		2574
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	5 736	3 02
11.2	3	267,6	59.6	8	4 487	31,1	3 842	2318
11,2	1	165,4	52.7	6	3 138	33,5	2 618	1731
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 72
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	283	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 Staglaire Supervisé par : Maxime Laplante-Bolvin, ing. jr. Félix Doucet, ing. M.Sc.A. Vérifié par :

Date : 11 juillet 2014 Date: 10 juillet 2014 11 juillet 2014 Date:



Projet: *AM-055-14 Type enrobé : **EB-10C Client : Jean-Pascal Bilodeau, Chaire i3C Type bitume : **PG 58-28 Note : Enrobé de base

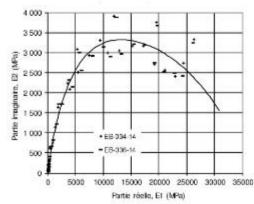
10

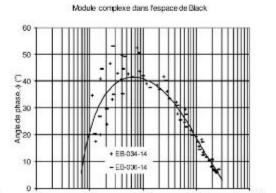
Teneur bitume: 5,3% Source enrobé: Carottes Cuve i3C

Teneur vides: 3,4% Ajout:

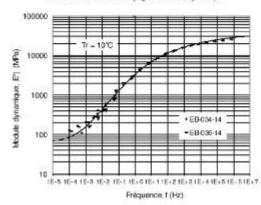
100







Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



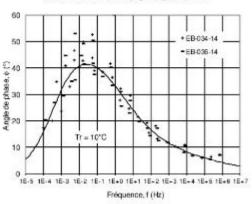
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase

1.000

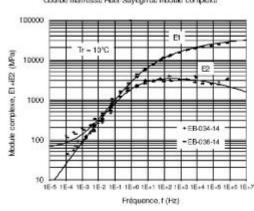
Module dynamique, [E*] (MPa)

10 000

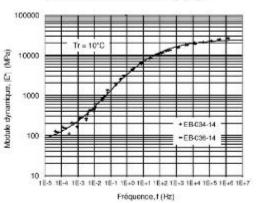
100 000



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe

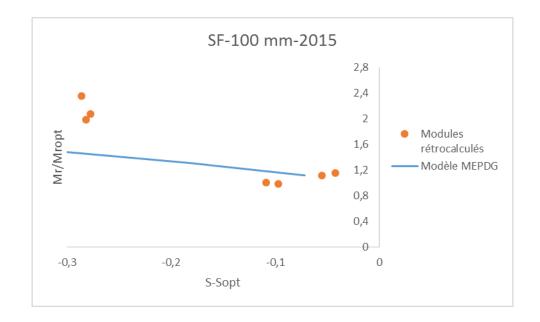


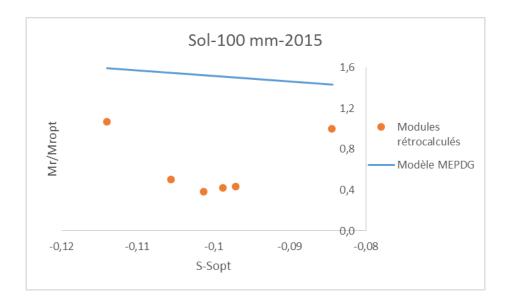
Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



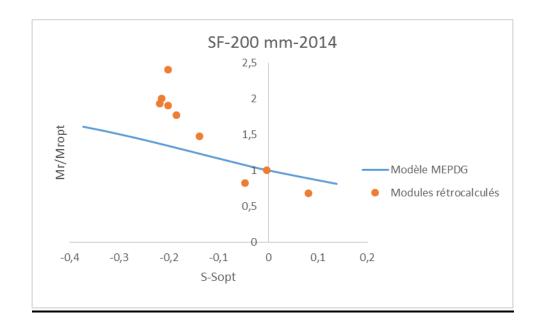
Annexe C: Modèle de prédiction du MEPDG

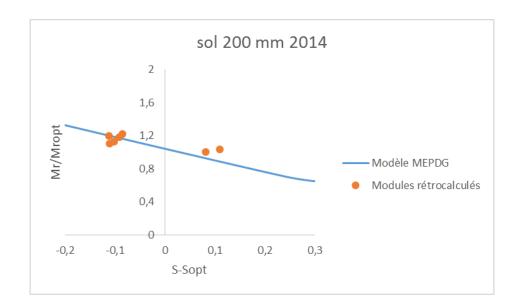
-Section 100 mm-2015





-Section 200 mm en 2014





-Section 200 mm en 2015

