



HAL
open science

Dimensionnement et analyse performancielle : définition de la notion d'Enrobé à Module Élevé (EME) adapté aux régions froides

Marion Scabello

► To cite this version:

Marion Scabello. Dimensionnement et analyse performancielle : définition de la notion d'Enrobé à Module Élevé (EME) adapté aux régions froides. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03197209

HAL Id: dumas-03197209

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03197209v1>

Submitted on 13 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Année scolaire
2018-2019

Voie d'approfondissement
Génie Civil – Infrastructures routières

Soutenu le mardi 03 septembre 2019, devant le jury composé de :

- Président du Jury : Salvatore MANGIAFICO
- Maître de TFE : Daniel PERRATON
- Expert : Hervé DI BENEDETTO

Par

Marion SCABELLO

Dimensionnement et analyse performancielle : définition de la notion d'Enrobé à Module Elevé (EME) adapté aux régions froides

Organisme d'accueil :
Ecole de Technologie Supérieure (ETS)
Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB)



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
Université du Québec



Notice analytique

AUTEUR		
NOM	Scabello	
PRENOM	Marion	
ORGANISME D'ACCUEIL		
NOM DE L'ORGANISME ET LOCALITE	Ecole de Technologie Supérieure (ETS) – Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumeux (LCMB) à Montréal, Québec, Canada	
NOM DU TUTEUR	Daniel PERRATON	
ANALYSE DU TFE		
TITRE	Dimensionnement et analyse performancielle : définition de la notion d'Enrobé à Module Elevé (EME) adapté aux régions froides	
TITLE	Pavement design and performance analysis : definition of the notion of high modulus asphalt mix for cold regions	
RESUME	<p>Les enrobés à haute performance, tels que l'EME français, permettent, entre autres, l'augmentation de la durée de vie des chaussées. Dans les régions froides, les conditions climatiques (températures froides, cycles de gel-dégel, ...) influent fortement sur la formulation et les performances des matériaux. L'objectif est de proposer une analyse performancielle de différents enrobés performants en établissant un coefficient de bonification lié au gain en durée de vie de chaussées permis grâce aux EME tout en montrant l'existence de couples module-résistance à la fatigue équivalents à ceux de l'EME français. Une méthode de calcul adaptée aux particularités du Québec rendra compte de la variabilité et de l'impact de la température sur le dimensionnement de chaussée.</p>	
ABSTRACT	<p>High performance asphalt concrete, such as the French « EME », can increase pavements lifespan. In cold regions, climatic conditions (cold temperature, freeze-thaw cycles, ...) influence the performances of bituminous materials. This paper aims at proposing a performance analysis of different high performances asphalt mixes using a coefficient related to the raise of lifespan and highlighting the existence of couple modulus-fatigue strength equivalent to the French <i>EME</i> performances. Then, a calculation method adapted to Quebec particularities will lead to show the variability and the impact of design temperature.</p>	
MOTS-CLES	Chaussée, dimensionnement, fatigue, durée de vie, température,	
KEY WORDS	Pavement, pavement design, fatigue, lifespan, temperature,	
TERMES GEOGRAPHIQUE	Canada, Québec, Montréal, France,	
COLLATION		
Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
47	2 (1 page)	19

Remerciements

Je souhaite remercier mon maître de TFE, Daniel PERRATON, professeur au département du génie de la construction de l'ETS, de m'avoir permis d'effectuer ce stage à Montréal au Canada au sein du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB). Merci pour votre aide et vos conseils tout au long de la réflexion autour de ce sujet. Les échanges que nous avons eu me seront très enrichissants pour la suite de ma vie professionnelle.

Je tiens également à remercier Sébastien LAMOTHE, professionnel de recherche au sein du LCMB d'avoir pris le temps de m'aiguiller dans la réflexion et dans la rédaction tout au long de mon stage.

Je souhaite aussi remercier particulièrement tous les étudiants et les techniciens du LCMB pour leur accueil chaleureux, leur bonne humeur et leur aide apportée au cours de mon stage.

Plus généralement, un grand merci à toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger à l'ETS lors des repas, des réunions ou des déplacements professionnels.

Table des matières

Notice analytique	1
Remerciements	2
Table des matières	3
Table des figures	5
Table des tableaux.....	6
Liste des symboles et des abréviations	7
Préambule.....	8
Partie 1 - Contextualisation	10
1.1 Impact des conditions climatiques canadiennes sur les chaussées	10
1.1.1 Températures et cycles de gel/dégel	10
1.1.2 Fissuration du revêtement due à la fatigue	12
1.2 Dimensionnement des chaussées au Canada.....	12
1.2.1 Constitution d'une structure de chaussée québécoise.....	12
1.2.2 Méthode mécanistique-empirique et hypothèses de calculs du logiciel OPECC	13
1.2.3 Notion de durée de vie et coefficient de bonification	16
1.3 Motivation et méthodologie.....	16
1.3.1 Notion d'EME et enjeux autour des conditions climatiques	16
1.3.2 Méthodologie et objectifs.....	17
1.4 Définition des situations de dimensionnements étudiées.....	18
1.4.1 Données communes à toutes les structures.....	18
1.4.2 Structures types françaises (type A)	18
1.4.3 Structure type québécoise (type B)	19
Partie 2 - Définition performancielle des EME en France.....	20
2.1 Utilisation d'EME en couche de base	20
2.1.1 Méthodologie de la simulation	20
2.1.2 Effets sur l'épaisseur du matériau de la couche de base	20
2.1.3 Effets sur la durée de vie et coefficient de bonification.....	21
2.2 Simulations à 5°C, 10°C et 15°C.....	22
2.2.1 Méthodologie de la simulation	22
2.2.2 Simulations à 15°C	22
2.2.3 Simulations à 5°C, 10°C et 15°C	24
2.2.4 Comparaison du ratio $N_f^{\text{site}} / N_f^{\text{site-GB3}}$ de différents enrobés	25
2.3 Conclusion et perspectives	26
Partie 3 - Equivalence des couples Module/Résistance à la fatigue	27
3.1 Courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6).....	27
3.2 Impact de la durée de vie N_f^{site}	28
3.3 Impact de la pente de fatigue a_2	30
3.4 Duplication des courbes d'équivalence selon αN_f^{site} et $\beta_{e_{\text{ref}}}$	32
3.4.1 Epaisseur fixée : duplication des courbes d'équivalence selon αN_f^{site}	32
3.4.2 Durée de vie fixée : duplication des courbes d'équivalence selon $\beta_{e_{\text{ref}}}$	33
3.4.3 Superposition des duplications αN_f^{site} et $\beta_{e_{\text{ref}}}$	34
3.5 Conclusion et perspectives	35

Partie 4 - Détermination de la température équivalente au Québec	36
4.1 Modélisation des particularités du Canada	36
4.1.1 Diversité des cycles de température de l'air	36
4.1.2 Structure étudiée	37
4.1.3 Modification de la capacité portante due au cycle de gel-dégel	38
4.1.4 Restrictions de trafic : zones de dégel et réduction de charges.....	38
4.2 Calcul de dommage et loi de Miner.....	38
4.2.1 Dommage cumulé.....	38
4.2.2 Dommage élémentaire	39
4.2.3 Variations de la résistance à la fatigue $\epsilon_6(\theta_i)$	39
4.2.4 Variations de la déformation horizontale $\epsilon_t(\theta_i)$	40
4.3 Calcul de la température équivalente à Montréal.....	40
4.3.1 Cycles de température à mi-couche de base (spécifique à la structure étudiée)	40
4.3.2 Calcul classique (sans variation de module ni restriction de trafic)	40
4.3.3 Calcul avec perte de capacité portante au cours du gel et du dégel	41
4.3.4 Impact de la prise en compte de la chute du module au dégel calculée avec OPECC	42
4.3.5 Calcul avec prise en compte des restrictions de charges.....	43
4.4 Conclusion et perspectives.....	44
Conclusion générale	45
Bibliographie	46
Annexes.....	47

Table des figures

Figure 1 - Réseau routier canadien	8
Figure 2 - Carte de la densité de la population du Canada	8
Figure 3 - Evolution du front de gel au cours du cycle de gel/dégel	11
Figure 4 - Zones de dégels au Québec	11
Figure 5 – Structures types québécoise et française	12
Figure 6 - Essieux jumelés standard français et nord-américain.....	14
Figure 7 - Modèle 2S2P1D	14
Figure 8 - Droites de Wöhler.....	15
Figure 9 - Structure type A-1.....	19
Figure 10 - Structure type A-2.....	19
Figure 11 - Structure type A-3.....	19
Figure 12 – Structure type B	19
Figure 13 - Effet du matériau sur l'épaisseur de la couche de base.....	20
Figure 14 - Effet de la température sur l'épaisseur de la couche de base	20
Figure 15 – Evolution du ratio de durée de vie en fonction de la température de dimensionnement..	21
Figure 16 – Relation entre le ratio de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-GB3}}$ et du ratio des modules E/E_{ref} à 15°C	23
Figure 17 – Exemple de situations équivalentes selon la relation entre le ratio de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-GB3}}$ en fonction du ratio des modules.....	23
Figure 18 – Variation du ratio de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-ref}}$ en fonction du ratio des modules E/E_{ref}	25
Figure 19 – Identification et comparaison performancielle d'enrobés selon la relation entre le ratio $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-ref}}$ et le ratio des modules E/E_{ref}	26
Figure 20 – Courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2.....	27
Figure 21 - Zones de performance de la courbe d'équivalence	27
Figure 22 - Exemple de modifications du couple (E, ϵ_6) pour atteindre les performances de l'EME2 ...	28
Figure 23 – Impact de la durée de vie sur la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6)	29
Figure 24 – Précisions sur la largeur du fuseau défini à la Figure 23	29
Figure 25 – Structures types étudiées pour connaître l'impact de la pente a_2	30
Figure 26 - Représentation des droites de Wöhler dans l'espace $\log(N_f) - \log(\epsilon_0)$ pour différentes valeurs de a_2	30
Figure 27 – Impact de la pente a_2 sur la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6)	31
Figure 28 – Précision sur la largeur du fuseau défini à la Figure 27.....	31
Figure 29 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 pour $e=207\text{mm}$ fixée.....	32
Figure 30 - Exemple d'analyse des courbes d'équivalences.....	32
Figure 31 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 pour $N_f^{\text{site}}= 27,1.10^6$	33
Figure 32 - Exemple d'analyse des courbes d'équivalence à durée de vie fixée.....	33
Figure 33 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 pour $N_f^{\text{site}}= 30,9.10^6$ ou $e=e_{\text{ref}}=207\text{mm}$ fixée.....	34
Figure 34 - Exemple d'analyse de la superposition des duplications des courbes d'équivalence.....	34
Figure 35 - Profils de température annuel de Montréal, Régina, Vancouver et Paris.....	36
Figure 36 - Carte du Canada	36
Figure 37 - Structure utilisée pour le calcul de la température équivalente.....	37
Figure 38 - Cycles de température mesurée à mi-couche de base.....	40
Figure 39 - Evolution du dommage élémentaire en fonction de la température (°C)	41

Figure 40 - Evolution du dommage cumulé sur une année	41
Figure 41 – Evolution du dommage élémentaire en fonction de la température (°C) avec impact du gel et du dégel.....	42
Figure 42 – Evolution du dommage cumulé au cours de l'année avec et sans impact du gel et du dégel	42
Figure 43 – Comparaison de la méthode de la prise en compte de la variation du module des couches granulaires au dégel.....	42
Figure 44 - Evolution du facteur de dommage relatif pour les 3 calculs.....	43

Table des tableaux

Tableau 1 - Données des principaux matériaux utilisés	18
Tableau 2 - Résultats et ratio de durée de vie	21
Tableau 3 - Résultats et ratio de durée de vie des simulations à 5°C, 10°C et 15°C	24
Tableau 4 - Exigences des enrobés comparés.....	25
Tableau 5 - Valeurs des températures de l'air moyennes mensuelles de Montréal, Régina, Vancouver et Paris.....	36
Tableau 6 - Paramètres 2S2P1D des matériaux ESG10 et GB20 utilisés	37
Tableau 7 - Températures à mi-couche de base pour le profil de température de Montréal et périodes de températures.....	40
Tableau 8 - Résultats du calcul classique de la température équivalente.....	40
Tableau 9 - Résultats du calcul avec perte ou gain de capacité portante due au gel/dégel	41
Tableau 10 - Comparaison de la prise en compte de la chute de module au dégel	42
Tableau 11 - Conclusions des calculs de température équivalente	44
Tableau 12 – Annexe 1 : Paramètres et données des matériaux.....	47
Tableau 13 – Annexe 2 : résultats et ratio obtenus à 0°C, 15°C et 30°C (section 2.1)	47

Liste des symboles et des abréviations

a_2	Pente de la droite de fatigue (pour SETRA-LCPC : $-1/b$)
a_3	Constante quantifiant les effets de température (pour SETRA-LCPC : $-1/2b$)
β_{risk}	Coefficient de calibration lié au risque de calcul
d_i	Dommage élémentaire
e	Epaisseur de la couche de base (mm)
ϵ_0	Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)
ϵ_6	Déformation pour obtenir une rupture en fatigue à 10^6 cycles à θ_{test} et f_{test} ($\mu\text{m}/\text{m}$)
ϵ_t	Déformation principale horizontale sous les couches de matériaux bitumineux ($\mu\text{m}/\text{m}$)
$\epsilon_{t,ad}$	Déformation maximale admissible en traction ($\mu\text{m}/\text{m}$)
$E(\theta, f)$	Module d'Young à la température θ et à la fréquence f (MPa)
E^*	Module complexe (MPa)
$ E^* $	Norme du module complexe calculé avec un modèle (MPa)
f	Fréquence de dimensionnement (Hz)
f_{test}	Fréquence du test de fatigue (en France, $f_{\text{test}}=25\text{Hz}$)
FC_P	Facteur de prédiction de la fissuration en fatigue pour le logiciel OPECC (%)
k_c	Coefficient de calibration lié au calage laboratoire-chantier
k_s	Coefficient de calibration lié à l'hétérogénéité de la couche non liée
$N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$	Coefficient fonction de la température et de la fréquence de l'essai de fatigue
N_f^{site}	Durée de vie maximale admissible de la chaussée
ν	Coefficient de Poisson
θ	Température de dimensionnement ($^{\circ}\text{C}$)
θ_{test}	Température du test de fatigue (en France, $\theta_{\text{test}}=10^{\circ}\text{C}$)
P	Période de dimensionnement (en année)
r	Risque (%)
τ	Croissance du trafic (%/an)

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
ESG	Enduit Semi-Grenu
EME	Enrobé à Module Elevé
ECAS	Equivalent Charge Axiale Simple (Nombre d'essieux équivalents)
GB3	Grave Bitume de classe 3
GB20	Grave Bitume 20mm
HPAC	<i>High Performance Asphalt Concrete</i>
VEL	Viscoélasticité Linéaire
M-E	Mécanistique empirique (approche, méthode)
OPECC	Outil de Prédiction de l'Évolution du Comportement des Chaussées
TMJA	Trafic Moyen Journalier Annuel

Préambule

Dans les régions froides telles que le Canada, les infrastructures routières sont exposées aux conditions climatiques dont les températures particulièrement basses, aux cycles de gel-dégel et à la neige pendant une période significative de l'année. Le réseau routier canadien (Figure 1) se concentre principalement sur les territoires où la densité de population reste élevée, soit principalement sur la partie sud du pays, alors qu'une grande partie des territoires du nord reste peu peuplée (Figure 2). Au regard du territoire entier, la densité du réseau routier canadien reste assez faible : 10,44km/100km². Elle est quasiment sept fois inférieure à la densité moyenne du réseau routier des Etats Unis (66,98km/100km²) et vingt fois inférieure à celle de la France (163,59km/100km²) (CIA World Book, 2019).



Figure 2 - Carte de la densité de la population du Canada (Statistiques Canada, 2006)



Figure 1 - Réseau routier canadien (Transports au Canada, 2010)

L'étendue du Canada lui procure une diversité de climats et de profils de températures nécessitant l'adaptation des structures de chaussées dès leur dimensionnement. Dans un contexte actuel d'économie et de réduction de la consommation des matériaux et des matières premières, des matériaux aux hautes performances, comme les Enrobés à Module Elevés (EME) français, sont développés dans la perspective d'améliorer la performance et la durée de vie des chaussées face à ces sollicitations climatiques. Dans les régions froides, en plus des températures basses, le dimensionnement d'une structure de chaussée doit prendre en compte l'impact des cycles de gel-dégel auxquels sont sujettes les chaussées tout au long de leur vie pour éviter la fissuration thermique. En revanche, lorsqu'on s'intéresse à une région chaude, la prise en compte du gel devient tout à fait secondaire. La notion d'« EME » dont les performances thermomécaniques permettent la réalisation de structures de chaussée à durée de vie prolongée est alors spécifique à la région considérée et à son propre climat.

Le sujet de ce mémoire s'inscrit dans un projet de recherche collaboratif, appelé RDC2, entre le Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'Ecole de Technologie Supérieure (ETS) située à Montréal, et l'entreprise CTA Eurovia-Canada. Ce programme de recherche réalise la caractérisation d'un EME adapté aux régions froides et l'utilisation de différentes méthodes mécanistiques-empiriques de dimensionnement de chaussées pour des structures avec HPAC (*High Modulus Asphalt Concrete*).

La notion d'« EME » sera définie dans la perspective du dimensionnement de structures de chaussées bitumineuses souples grâce à des simulations numériques suivant la méthode mécanistique-empirique (méthode M-E). L'objectif principal de ce mémoire est de définir la notion d'« EME » adapté aux régions froides et de préciser les caractéristiques nécessaires en termes de module et de résistance à la fatigue. Pour ce faire, la durée en fatigue de structures de chaussées comportant des matériaux hautes performances en couche de base est comparée à celle de structures

comportant des matériaux de performances classiques. La notion de couple module-résistance à la fatigue répondant à la notion d'EME telle que définie en France sera introduite dans cette étude.

En plus d'une introduction, d'une conclusion et de quelques annexes, ce mémoire se compose de quatre parties. Dans un premier temps, il offre au lecteur une contextualisation du sujet pour comprendre l'impact des conditions climatiques québécoises sur les chaussées avant d'introduire les principes de la méthode M-E et la méthodologie utilisée.

La seconde partie expose une définition performancielle des EME telle que définie en France. Ce niveau de performance peut être défini par un ratio de bonification lié au gain de durée de vie d'une chaussée comportant un EME et ce, selon les différentes températures de dimensionnement.

La troisième partie met en valeur l'existence de couples module-résistance à la fatigue équivalents à ceux de l'EME français et l'impact de plusieurs paramètres (durée de vie, pente de fatigue, épaisseur de la couche de base, ...).

La dernière partie traite de la notion de température équivalente et propose une méthode de calcul adaptée aux particularités du Québec.

Partie 1 - Contextualisation

Cette partie met en contexte le sujet et ses motivations ainsi que d'exposer la méthodologie employée dans le contenu de ce présent rapport.

1.1 Impact des conditions climatiques canadiennes sur les chaussées

1.1.1 Températures et cycles de gel/dégel

Le climat nordique rend les structures de chaussées sensibles puisque les variations des températures sur l'année impactent fortement les propriétés thermomécaniques des matériaux bitumineux situés dans les couches des chaussées. La capacité portante de la chaussée est modifiée au dégel suivant un gel prolongé de la structure de chaussée à cause notamment de la rétention d'eau (Lachance, 1999). Il est possible de considérer que les structures de chaussées sont soumises à un long et complet cycle de gel et de dégel (périodes hivernale et printanière), mais des cycles de gel/dégel partiels peuvent également survenir à la suite des variations ponctuelles de températures en période de gel.

Il est important de comprendre le processus d'un cycle de gel-dégel au sein de la chaussée ainsi que les principaux dommages engendrés au niveau de la chaussée. L'évolution de la profondeur de gel varie lors d'un cycle complet de gel et de dégel (Figure 3). Généralement, au Canada, le gel pénètre dans la chaussée dès la fin de l'automne et pendant tout l'hiver jusqu'au dégel printanier pouvant durer jusqu'à la fin du mois de mai (Lachance, 1999). Dans les régions comportant des indices de gel¹ au minimum entre 800 et 2000°C.j, une profondeur de gel située entre 1,2 et 2,0 mètres est constatée (Konrad & Roy, 1997). Notons que les villes de la province de Québec telles que Montréal, Québec et Chicoutimi présentent respectivement des indices de gel moyens lors d'un hiver normal de 1000°C.j, 1200°C.j et 1500°C.j². Pour comparaison, on retiendra qu'en France métropolitaine, les indices de gel moyens lors d'un hiver normal à Paris, Bordeaux et Strasbourg valent respectivement 26°C.j, 13°C.j et 76°C.j.

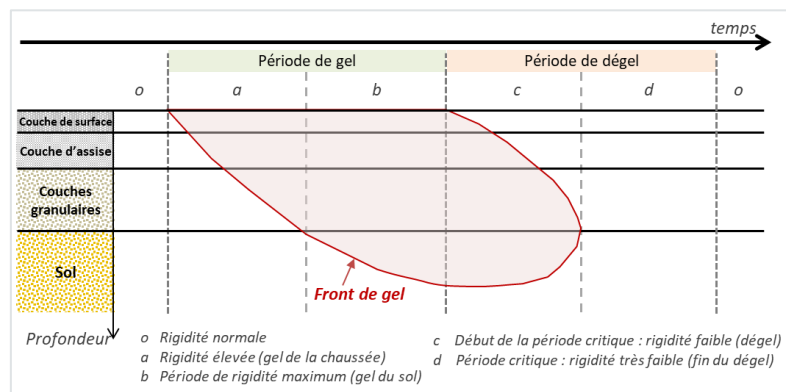
Lors du gel, les caractéristiques des matériaux des couches granulaires améliorent de façon considérable la portance de la chaussée grâce au gel de l'eau contenue entre les granulats. En effet, les matériaux granulaires comportent une forte teneur en vide, favorisant la présence d'eau gelant aux basses températures. De plus, le bitume contenu dans les couches bitumineuses se rigidifie aux basses températures. Alors, la croissance du module des enrobés (E) augmente la capacité portante globale de la chaussée. Cependant, aux basses températures, la rigidification des matériaux bitumineux les fragilise face aux sollicitations du trafic (St Laurent & Roy, 1995). En revanche, en cas de présence d'eau, la pénétration du front de gel dans la chaussée peut aussi engendrer des dommages importants à la suite de la formation de lentilles de glace provoquant un phénomène de soulèvement de la chaussée. Le soulèvement au gel est la conséquence de trois phénomènes : les températures négatives observées sur une période suffisamment longue forçant la pénétration du front de gel jusqu'au support (l'infrastructure), la gélivité de l'infra et la présence d'eau libre dans les couches de la chaussée (par remontée capillaire depuis le sol ou infiltration depuis la surface) (Doré & Zubeck, 2008). Cependant, la perte de capacité portante des chaussées au Québec n'est pas uniquement liée à ce phénomène de soulèvement.

A la fin de l'hiver, lorsque les températures deviennent positives, le dégel de la chaussée commence (période c, Figure 3). Le dégel s'effectue du haut vers le bas à l'arrivée des températures au-dessus de 0°C. La vitesse du dégel et la teneur en eau dans la chaussée élevée par rapport au reste de l'année sont des facteurs importants pour la tenue de la structure lors du dégel (Lachance, 1999).

¹ Somme cumulée des températures moyennes journalières calculée à partir du premier jour pour lequel la température moyenne devient négative.

² Données Bitume Québec, 2010.

Hormis les dégels partiels durant l'hiver affectant les caractéristiques des couches granulaires, la fin du dégel est un moment particulièrement critique pour la rigidité de la structure. Lorsque le front de gel venant du haut et du bas se rejoignent (période *d*, Figure 3), une accumulation d'eau se loge alors dans les couches granulaires. En effet, la mobilité de l'eau au sein du corps de chaussée gelé après l'hiver peut être réduite alors que le dégel depuis la surface contribue à un apport d'eau dans la structure de la chaussée. Toute cette eau enclavée sous le revêtement dans les fondations granulaires ne peut s'évacuer par gravité car le sol est lui aussi gelé. Cette accumulation d'eau stagnante induit ainsi une perte de capacité portante de la structure de chaussée en période de dégel printanier. Une teneur en eau alors élevée couplée avec la teneur en vide importante des couches granulaires de la chaussée engendre un affaiblissement de la structure et une forte déflexion des couches de la structure suite aux sollicitations du trafic (Lachance, 1999). La perte de capacité portante peut atteindre entre 20% et 60% dépendamment de la nature gélive du sol, des performances mécaniques des matériaux employés et de leur épaisseur dans la structure (Doré & Zubeck, 2008).



Pour minimiser les dommages du dégel sur les chaussées plus sensibles, les ministères des Transports de chaque province du Canada définissent des périodes de dégel, réparties par zone, adaptées à leur territoire pendant lesquelles des restrictions de charges sont appliquées pour les véhicules lourds. Chaque printemps, le ministère des Transports du Québec délimite trois zones de dégel en tenant compte principalement de la profondeur habituelle de gel, de l'évolution du dégel et de la circulation des véhicules lourds dans l'axe est-ouest (Figure 4). De manière générale, les restrictions de charges varient de 8% à 20% (Transport Quebec, 2019).



1.1.2 Fissuration du revêtement due à la fatigue

Les fissures de fatigue, ou appelées *Alligator Fatigue Cracking* à cause de leur apparence rappelant le motif de la peau d'un crocodile, apparaissent en surface de la chaussée (au niveau du revêtement) en deux sillons distincts au niveau du passage répété des roues des véhicules (les traces de roues). Elles sont causées par la répétition d'un grand nombre de petites déformations restant inférieures à la déformation qui causerait la rupture du matériau : phénomène de fatigue. Lorsque le drainage est déficient, ce phénomène s'aggrave pour les chaussées, car les couches granulaires sont affaiblies par une forte teneur en eau et donc, les couches des matériaux bitumineux sont soumises à des déformations plus importantes. Cette situation est typique du dégel des chaussées (Doré & Zubeck, 2008). Ces fissures sont de type *Bottom-Up* : elles se forment en bas des couches de matériaux bitumineux (couches d'assise ou de base) et remontent jusqu'à la couche de surface. L'apparence de la surface de la chaussée n'est donc qu'un indice d'un problème bien plus important dans les couches inférieures. La durée de vie des chaussées étudiées, lors des simulations présentées dans ce rapport, est calculée suivant la résistance en fatigue des couches bitumineuses de la chaussée.

1.2 Dimensionnement des chaussées au Canada

1.2.1 Constitution d'une structure de chaussée québécoise

Le premier rôle d'une structure est de supporter les répétitions des sollicitations du trafic. Le deuxième aspect, prédominant dans les régions froides, est d'atténuer les dégradations générées par les sollicitations climatiques telles que le gel et les variations des températures saisonnières et journalières afin de conserver la capacité portante et les performances de la structure tout au long de l'année. C'est en partie pourquoi les structures types des chaussées souples québécoises diffèrent des structures types françaises même si le modèle multicouche reste similaire. La Figure 5 propose une analogie entre les deux structures types.

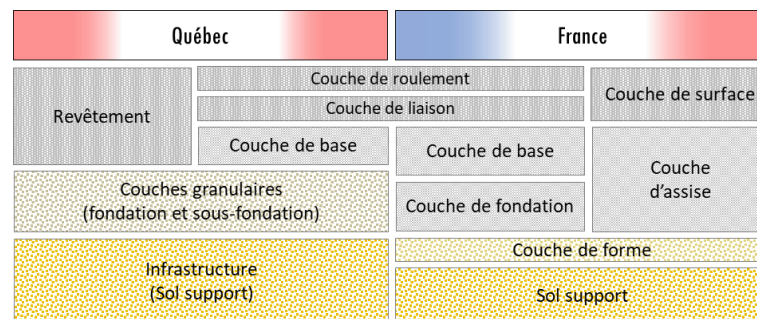


Figure 5 – Structures types québécoise et française
(Adaptée de Carter & Perraton, 2019)

Une structure de chaussée type Québécoise est composée d'une couche de surface liée, d'une couche de base liée (couche d'assise en France) et de couches granulaires, de fondation et sous-fondation, reposant sur le sol support (l'infrastructure). On désigne de "revêtement" les différentes couches liées qui recouvrent les couches granulaires. La couche de surface est composée généralement d'un enrobé de surface, tel que l'ESG10, de faible épaisseur dont le rôle est similaire à la couche de surface d'une chaussée française, soit d'apporter à la chaussée ses caractéristiques de surface (adhérence, sécurité, ...) tout en préservant les couches inférieures des agressions extérieures dues aux conditions climatiques pouvant provoquer des remontées de fissures et des infiltrations d'eau ou de polluants. La couche de surface participe aussi à la durabilité de la structure en répartissant les sollicitations du trafic sur les autres couches pour atténuer les phénomènes d'orniérage et de fatigue.

La couche de base liée du revêtement apporte à la structure l'essentiel de sa rigidité tout en réduisant les sollicitations au sein de la structure de chaussée. La répétition des sollicitations du trafic génère de la flexion des différentes couches liées du revêtement pouvant conduire à un phénomène

de fissure par fatigue initié à sa base et remontant en surface. Afin d'éviter au maximum les dégradations mécaniques de la structure, des performances élevées en termes de module et de résistance en fatigue sont recherchées pour l'enrobé bitumineux de la couche de base du revêtement. La problématique traitée par ce document concerne, en partie, de la performance des matériaux constituant cette couche de base liée. Notons que la GB20 (grave bitume 0-20mm) est utilisée en couche de base pour les structures québécoises laquelle présente des propriétés analogues à celles de la GB3 (grave bitume de classe 3) en France.

Pour les chaussées construites en régions froides, les couches granulaires ont alors un rôle primordial dans la structure de chaussée pour atténuer l'impact des facteurs environnementaux : la fonction de drainage permet de réguler la teneur en eau dans les couches supérieures, une fonction de filtrage pendant le dégel pour minimiser la migration des particules fines polluantes vers le sol, une fonction de barrière protectrice au gel, en accumulant la chaleur, elle réduit le soulèvement au gel et la perte de capacité au dégel. Son épaisseur doit être déterminée pour réduire la pénétration du gel dans les couches inférieures (Doré & Zubeck, 2008).

Enfin, même si le sol support n'est pas une partie intégrante de la structure de chaussée, sa portance et sa gélivité sont des caractéristiques importantes dans le dimensionnement de la structure de la chaussée

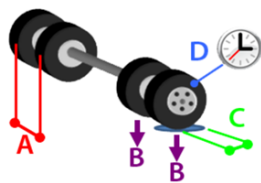
1.2.2 Méthode mécanistique-empirique et hypothèses de calculs du logiciel OPECC

Au Canada, le dimensionnement des routes est basé suivant une approche empirique, basée sur l'expérience et l'observation des chaussées en service similairement à la méthode AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Cette méthode atteint sa limite lors de l'introduction de nouveaux matériaux et nouvelles approches. La plus-value de l'utilisation d'EME, enrobés ayant des caractéristiques thermomécaniques améliorées, dans un contexte climatique de régions froides, ne peut pas être mise en évidence par une telle méthode.

Des logiciels de dimensionnement de chaussées, tels que le logiciel OPECC, proposent une méthode mécanistique-empirique (M-E) permettant de prendre en compte ces matériaux avec une plus-value dans le cadre du dimensionnement d'une chaussée. La méthode M-E utilise à la fois une fonction de transfert empirique et un modèle mécanique. Les fondements empiriques reposent sur l'utilisation de modèles de performances en fatigue à travers une fonction de transfert empirique pour le calcul de la déformation maximale admissible en traction ($\epsilon_{t,ad}$) à partir du nombre de cycles de sollicitations pendant la période de dimensionnement (P). Les fondements mécanistiques reposent sur des lois de comportement telles que la loi de fatigue Wöhler ou la loi de Miner (calcul des dommages élémentaires) utilisées pour le calcul de l'épaisseur minimale nécessaire au dimensionnement de la chaussée (Doré & Zubeck, 2008).

Les paramètres d'entrée, constitués des données des matériaux, trafic et climatiques, doivent être représentatifs de la saison et du type de chaussée étudiée. Le dimensionnement des chaussées souples via le logiciel OPECC utilise la méthode de dimensionnement mécanistique-empirique (M-E) fondée sur ces principes de calcul

L'effet du trafic - Le trafic de tous les véhicules est regroupé par la notion d'un chargement axial ou essieu équivalent (appelé ÉCAS). La charge d'un essieu standard en Amérique du nord est de 80 kN contre 130 kN pour l'essieu standard français. La Figure 6 compare les principaux paramètres des deux essieux standards. Pour une comparaison plus aisée, les simulations seront effectuées avec l'essieu jumelé standard français.



Type d'essieu	Essieu jumelé standard France	Essieu jumelé standard CND/USA
A Distance entre les roues (cm)	37,5	34,3
B Charge appliquée par roue (kN)	32,5	20,0
C Rayon de la trace des roues (cm)	12,5	10,4
D Pression dans les roues (kPa)	662,0	587,0
Charge axiale totale (kN)	130	80

Figure 6 - Essieux jumelés standard français et nord-américain

Le profil de température – Les variations de température dans la structure de chaussée sont basées sur la théorie de la conductivité de la chaleur et de l'équation développée par SHAO, PARK et KIM (Meunier & Perraton, 2010). Le logiciel OPECC prend en compte le gradient de température selon la profondeur. Les modules des différents matériaux bitumineux de la structure de chaussée sont déterminés aux températures correspondantes à celles déterminées à mi-couche de la couche considérée.

Les matériaux – Dans le dimensionnement des chaussées, les matériaux bitumineux sont considérés comme un milieu continu et un matériau homogène, viscoélastique linéaire, isotrope, et thermosensible semblablement à leur description dans la littérature (Di Benedetto & Corté, 2005). Le Tableau 1 (§ 1.4.1) renseigne les données utiles des principaux matériaux utilisés dans les simulations présentées dans ce document. Toutes les propriétés des matériaux utilisés sont présentées en annexe 1.

Modélisation de la structure et des propriétés viscoélastique linéaire (VEL) des matériaux bitumineux –

La structure de chaussée est considérée comme un modèle élastique multicouche. Pour la suite, les couches de la structure seront considérées parfaitement collées. Le module d'Young $E(\theta, f)$ peut être variable pour chacune des couches en fonction du profil de température choisi. Les déformations et contraintes dans la structure de chaussée sont calculées suivant l'approche de Burmister sous l'action d'un demi-essieu simple jumelé (voir Figure 6). Le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux est basé sur le modèle de calcul viscoélastique linéaire « 2S2P1D » (2 Springs, 2 Parabolic Elements, 1 Dashpot) issu du modèle de Huet-Sayegh (Di Benedetto & Olard, 2003). Le calcul des modules complexes (E^*) des matériaux bitumineux est effectué en utilisant le modèle reproduit à la Figure 7. Le module E^* est calculé avec la fonction de transfert qui est représentée par l'équation [1].

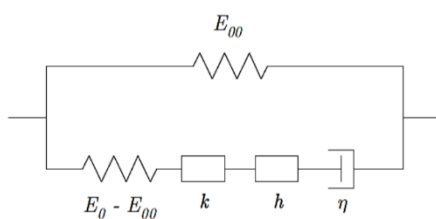


Figure 7 - Modèle 2S2P1D

$$\frac{E^* - E_{00}}{E_0 - E_{00}} = \frac{1}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad [1]$$

Les constantes E_{00} , E_0 , δ , k , h , τ , β permettent de modéliser le comportement VEL du matériau considéré. Ce modèle permet d'obtenir une courbe maîtresse (*master curve*) à une température de référence et permet de connaître les valeurs de module du matériau pour des couples température-fréquence donnés, $E(\theta, f)$. Lors d'un calcul dans OPECC avec un profil de température mensuel précis, la valeur du module $E(\theta, f)$ correspondante à chacune des couches du revêtement est calculée avec le modèle 2S2P1D. Pour certaines simulations effectuées à température fixe, il est possible de fixer la valeur du module $E(\theta, f)$ de chacune des couches bitumineuses et dans ces conditions, le modèle 2S2P1D n'est pas utilisé par le logiciel OPECC.

Les déformations – Les déformations horizontales (ϵ_x) sont déterminées à la base de chacune des couches de matériau bitumineux à l'aide du logiciel OPECC. Dans le cadre de l'étude actuelle et dans le

cas d'un dimensionnement en fatigue, la déformation prise en compte dans le calcul de la durée de vie est la déformation principale horizontale (ϵ_t) mesurée sous la couche de base du revêtement.

Les paramètres de fatigue – La rupture à la fatigue a lieu suite à l'application d'un très grand nombre de répétitions de petites déformations qui sont bien inférieures à la déformation maximale admissible ($\epsilon_{t,ad}$). La valeur significative de la résistance à la fatigue d'un matériau est ϵ_6 qui correspond à la déformation qui cause la rupture de l'éprouvette du matériau après 1 millions (10^6) de sollicitations. Cette valeur de résistance à la fatigue ϵ_6 est déterminée à la température et à la fréquence d'essai (θ_{test} et f_{test}), soit $\theta_{test} = 10^\circ\text{C}$ et $f_{test} = 25\text{Hz}$ en France (AFNOR, 2011). Après plusieurs essais de fatigue en laboratoire, il est possible d'obtenir la droite de fatigue ou droite de Wöhler à θ_{test} et f_{test} dans l'espace $\log(N_f)$ - $\log(\epsilon_0)$ pour déterminer la valeur de a_2 et la valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$, propres au matériau. Par analogie avec la norme française, on note que $a_2 = -1/b$ et $a_3 = -1/2b$ (Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019).

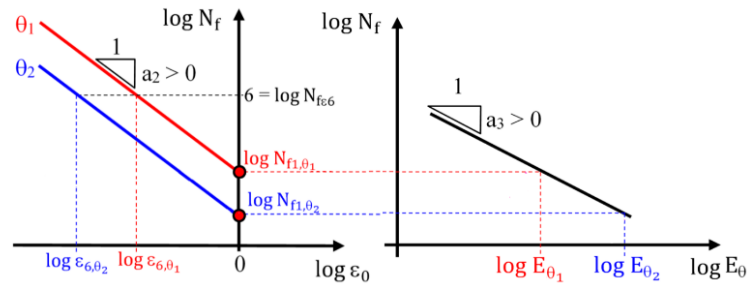


Figure 8 - Droites de Wöhler
(Adapté de Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019)

La relation entre la durée de vie en fatigue ($N_{f,\theta}$) établie en laboratoire suivant un critère de rupture donné et l'amplitude de sollicitation imposée (ϵ_0), peut alors s'écrire :

$$N_{f,\theta} = N_{f1}(\theta_{test}, f_{test}) \cdot E(\theta_{test}, f_{test})^{a_3} \cdot E(\theta, f)^{-a_3} \cdot \epsilon_0^{-a_2} \tag{2}$$

Dans OPECC, la valeur de l'ordonnée à l'origine $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ (Figure 8) est utilisée à l'instar de la valeur ϵ_6 définie dans SETRA-LCPC. La valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ correspond au nombre de sollicitations du matériau à la déformation de référence du test de fatigue valant 1 m/m. Ces deux valeurs sont reliées par l'équation [3] prenant en compte la valeur de la pente a_2 (Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019) :

$$\epsilon_6(\text{m/m}) = (N_{f1}(\theta_{test}, f_{test}) \cdot 10^{-6})^{1/a_2} \tag{3}$$

Très souvent, le critère de rupture par fatigue considéré correspond au nombre de sollicitations jusqu'à la perte de 50% du module initial de l'enrobé considéré. Ce critère de rupture n'est pas adapté à toutes les familles d'enrobés bitumineux comme ceux comportant une forte teneur en polymères car les effets biaisant (non-linéarité du matériau, chaleur introduite par dissipation d'énergie visqueuse, effets de la thixotropie) peuvent être trop importants et ils ne constituent pas en soi du dommage par fatigue du matériau (Perraton, Carter, Proteau, Lamothe, & Pouteau, 2018).

La notion de risque – La prédiction de la fissuration par fatigue est étroitement liée à la notion de risque. Le risque représente la proportion (en pourcentage) de la surface du revêtement qui est fissurée à la fin de la période (P) de dimensionnement. Alors, un risque valant 50% correspond à une surface de chaussée fissurée à 50% ou à une chaussée à 100% fissurée au niveau du passage (traces de roues) des véhicules à la fin de la période de dimensionnement. Alors, lorsque la valeur du risque est réduite, la proportion de la surface de la chaussée fissurée considérée pour le dimensionnement, doit être plus faible nécessitant une structure de chaussée plus performante, plus résistante à la fatigue : une épaisseur des couches du revêtement plus importante ou l'utilisation d'un matériau plus performant en fatigue en couche de base est requis.

1.2.3 Notion de durée de vie et coefficient de bonification

Afin de relier le modèle de résistance en fatigue, décrit à l'équation [2] (§1.2.2), aux performances réelles de la chaussée grâce à plusieurs paramètres de calibration, la durée de vie maximale admissible sur route (N_f^{site}) tel que considéré dans OPECC, est calculée suivant l'équation [4] (Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019) :

$$N_f^{\text{site}} = \beta_{a_1} \cdot \beta_{\text{risk}} \cdot N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) \cdot \varepsilon_t^{-a_2} \left[\frac{E(\theta, f)}{E(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})} \right]^{-a_3} \quad [4]$$

Où :	β_{a_1} :	Coefficient de calibration ($\beta_{a_1} = (k_c \cdot k_s)^{a_2}$)
	k_c :	Coefficient de calibration lié au calage laboratoire-chantier
	k_s :	Coefficient de calibration lié à l'hétérogénéité de la couche non liée
	β_{risk} :	Coefficient de calibration lié au risque de calcul ($\beta_{\text{risk}} = k_r^{a_2}$)
	$N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$:	Coefficient fonction de la température et de la fréquence de l'essai de fatigue
	ε_t :	Déformation principale horizontale sous les matériaux bitumineux (sous la couche de base)
	a_2 :	Pente de la droite de fatigue (pour SETRA-LCPC : -1/b)
	a_3 :	Constante quantifiant les effets de température (pour SETRA-LCPC : -1/2b)
	θ :	Température de dimensionnement (°C)
	f :	Fréquence de dimensionnement (Hz)
	θ_{test} :	Température du test de fatigue (°C)
	f_{test} :	Fréquence du test de fatigue (Hz)

Pour quantifier le gain de durée de vie d'une chaussée comportant de l'EME en couche de base par rapport à une chaussée classique comportant de la GB3, le coefficient de bonification ou ratio de durée de vie est établi suivant l'équation [5] :

$$\frac{N_f^{\text{site}}}{N_f^{\text{site-GB3}}} \quad [5]$$

1.3 Motivation et méthodologie

1.3.1 Notion d'EME et enjeux autour des conditions climatiques

Comme souligné précédemment, L'EME est un matériau aux performances thermomécaniques élevées, permettant la réalisation de structures de chaussée à durée de vie prolongée, tout en possédant des caractéristiques et des exigences bien définies à son égard (composition homogène, compactage élevé, épaisseur usuelle, dureté élevée du bitume). Notamment, les exigences françaises spécifient deux classes d'EME : l'EME1 et l'EME2 (AFNOR, 2011). Ces deux matériaux sont de module identique dont l'exigence minimale est fixée à 14 000MPa à 15°C et 10Hz et dont la teneur spécifiée en vide est faible, ce qui leur permet d'avoir une résistance à la fatigue importante, soit des valeurs d' ε_s de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ et 130 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivement.

En France, mis au point il y a une trentaine d'années, les EME fabriqués avec bitumes durs, usuellement de classe 10/20 ou 15/25, représentent environ une production annuelle de 5 millions de tonnes parmi la production totale d'enrobé d'environ 37 millions de tonnes en 2015. Entre 1990 et 2010, la production d'EME a été en croissance due, en partie, au besoin croissant de travaux d'entretien et de renforcement des chaussées existantes (Brosseaud & Saint-Jacques, 2015).

A plusieurs reprises, des transferts de technologie pour développer la technologie des EME à l'étranger ont été tentés en Europe (la Pologne, l'Espagne, la Belgique, le Royaume Uni, l'Italie, ...). Cependant, la disponibilité de matériaux similaires, l'ajustement de la formule, les conditions de mise en œuvre en chantier et les sollicitations climatiques locales constituent des obstacles à l'utilisation de cette technologie. La principale préoccupation reste d'adapter les caractéristiques des liants disponibles localement aux conditions climatiques. Depuis 2002, une expérimentation de l'utilisation d'EME a été menée à Poznan en Pologne, un pays où le climat peut comporter des hivers particulièrement froids comparativement à la France métropolitaine. L'emploi d'un EME 0-16 mm avec un liant semi dur s'est avéré concluant et la chaussée n'a pas rencontré de problème de fissuration thermique. En 2006, la Pologne a défini les spécifications mécaniques en module $E(10^{\circ}\text{C}, 10\text{Hz}) > 16000 \text{ MPa}$ pour l'emploi d'EME sur son territoire (Brosseaud & Saint-Jacques, 2015). Alors, qu'en France, le module des EME1 et EME2 est défini à 15°C et 10Hz, cet exemple illustre l'impact du climat local sur la définition de l'EME.

Face à sa grande dépendance au contexte climatique, la notion d'EME est définie alors localement. En effet, suivant le climat considéré, un climat plutôt tempéré comme en France métropolitaine ou un climat plutôt froid comportant des hivers longs et rigoureux, comme au Québec, vont soumettre les chaussées à des extrêmes et des fluctuations de températures très variables. Lorsque la température moyenne annuelle est semblable à celle de la France (15°C - 20°C), les performances de l'enrobé aux températures inférieures à celle du gel restent peu prises en compte lors du dimensionnement de la chaussée alors qu'elles deviennent cruciales dans les régions soumises au froid prolongé comme au Québec afin d'éviter la fissuration thermique des matériaux bitumineux. La notion d'EME doit alors nécessairement différer suivant les régions du monde considérées. Des enrobés haute performance (HPAC, *High Performance Asphalt Concrete*) commencent à apparaître dans le dimensionnement des chaussées québécoises dans la perspective de l'ouvrage afin d'améliorer leur performance aux basses températures ainsi que leur durée de vie (Perraton, Carter, Proteau, Lamothe, & Pouteau, 2018).

1.3.2 Méthodologie et objectifs

Dans un premier temps, l'objectif est de définir la notion d'enrobé à module élevé propre au Canada en se référant aux exigences définies en France. Les exigences associées à l'EME en France sont considérées comme base de référence (AFNOR, 2011). Les structures étudiées sont similaires : seule la couche de base du revêtement est variable c'est-à-dire la couche où le recours à l'EME est effectif. Le dimensionnement des structures de chaussée est réalisé suivant la résistance en fatigue (fissuration de type *bottom-up*). La comparaison de la performance des différents EME est effectuée en considérant la durée de vie de la chaussée et un coefficient de bonification (ou ratio de durée de vie). Cet indice de performance rend compte du gain de la durée de vie d'une structure de chaussée comportant de l'EME en couche de base par rapport à une structure de chaussée conventionnelle comportant un enrobé standard de type GB20 ou GB3 en couche de base. Différentes durées de vie et coefficients de bonification sont calculés suivant plusieurs caractéristiques mécaniques de module E et de résistance à la fatigue ϵ_6 des enrobés pour plusieurs profils de température. Toutes les simulations seront effectuées via le logiciel OPECC.

Dans un second temps, des couples performanciers de module-fatigue cibles sont recherchés afin d'atteindre des coefficients de bonification semblables à ceux établis pour les structures de chaussées françaises étudiées dans la partie précédente (§2.1 et §2.2).

Dans un dernier temps, compte tenu de la grande variété des profils de température au Canada, l'objectif est de proposer un calcul de la température équivalente adapté aux particularités de ce pays en termes de profils de températures, de structure de chaussée et d'impact du cycle de gel-dégel. Plusieurs régions cibles sont retenues pour les particularités de leur profil de température annuel soit : l'est du Canada (Montréal), le centre du Canada (Régina) et l'ouest canadien (Vancouver). Toutefois, dans ce rapport, la température équivalente a été calculée uniquement pour Montréal.

1.4 Définition des situations de dimensionnements étudiées

Les simulations présentées dans ce document ont été réalisées en considérant un cas type dont le cadre et les données sont détaillés ci-dessous.

1.4.1 Données communes à toutes les structures

Généralités

- La période de dimensionnement est fixée à $P=20$ ans pendant laquelle la croissance du trafic (τ) vaut 2%/an
- Le type d'essieu considéré est l'essieu jumelé standard français de 130 kN (détails à la Figure 6).
- Le type de chaussée étudiée est considéré comme une autoroute où la vitesse de circulation des véhicules est de 100km/h.
- Le risque (r) vaut 50%. Le calcul de la durée de vie s'affranchit totalement du coefficient de calibration liée au risque puisque le coefficient $\beta_{\text{risk}} = k_r^{a_2} = 10^{-|u\delta|}$ et pour une valeur de risque de 50%, la valeur u de la variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque vaut 0, donc $\beta_{\text{risk}} = 1$.

Températures et fréquences

- La température du test (θ_{test}), au niveau de la caractérisation (ou résistance) en fatigue, est de 10°C et la fréquence associée (f_{test}) est de 25Hz.
- Sauf indication contraire, la fréquence de dimensionnement (f) considérée est de 10Hz.

Matériaux

- Le Tableau 1 renseigne les données utiles des principaux matériaux utilisés dans les simulations présentées dans le présent document. Toutes les données relatives aux propriétés des matériaux utilisés sont présentées à l'annexe 1.
- La limite entre les chaussées souples et les chaussées rigides est fixée par des modules (E) de l'ordre de 40 000 à 45 000MPa. Cette limite équivaut en soi à un ratio E/E_{EME} proche de 3,0 et est plutôt de 4,5 en considérant le ratio E/E_{GB3} .

Tableau 1 - Données des principaux matériaux utilisés

Couche	Type	Epaisseur (mm)	E (0°C, 10Hz) ¹ (MPa)	E (5°C, 10Hz) ² (MPa)	E _{0test} (10°C, 10Hz) ¹ (MPa)	E (15°C, 10Hz) ¹ (MPa)	E (30°C, 10Hz) ¹ (MPa)	E _{6,0test} (10°C, 25Hz) ¹ (μm/m)	N _{f1} (θ _{test} , f _{test}) ²	v ¹	SN _f ¹ (m)	k _c ¹	k _s ³	-1/b (a ₂) ¹	a ₃	β _{a1}
Surface	BBSG1	60	12 000	9 856	7 315	5 500	1 300	100	1.00E-14	0.35	0.25	1.1	0.91	5.0	2.5	1.00
Base	GB3	Variable	18 300	15 090	11 880	9 000	2 700	90	5.90E-15	0.35	0.30	1.3	0.91	5.0	2.5	2.30
	EME1-A		24 000	20 470	16 940	14 000	6 000	100	1.00E-14	0.35	0.30	1.0	0.91	5.0	2.5	0.62
	EME2-A		24 000	20 470	16 940	14 000	6 000	130	3.71E-14	0.35	0.25	1.0	0.91	5.0	2.5	0.62
Sol		∞	-	-	-	50	-	-	-	0.35	-	-	-	-	-	-

¹ Pour BBSG1, EME1, EME2 et GB3 : seulement Base de données Alyzé (Norme NF P98-086 annexe F normative)

² $N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}}) = 10^6 \cdot (\epsilon_{6, |m/m|})^{a_2}$

³ $k_s = \frac{1}{1,1}$ pour $50\text{MPa} \leq E_{\text{sol}} < 120\text{MPa}$

1.4.2 Structures types françaises (type A)

Les structures types A-1, A-2 et A-3 sont similaires aux structures françaises. Elles comportent une couche de roulement (BBSG1) d'épaisseur fixée à 60mm, une couche de base liée constituée de divers matériaux (GB3, EME1, EME2, ...) reposant sur un sol de portance de 50MPa. Seule l'épaisseur de la couche de base liée est variable. Les EME1 et EME2 possèdent des modules identiques, mais une résistance à la fatigue différente, valeur de ϵ_6 , impactant sur le nombre de cycles admissibles ou la durée de vie N_f^{site} .

➤ **Structure type A-1**

Le trafic est initialement fixé à un nombre d'ÉCAS (cumulé sur 20ans) de $4,84 \cdot 10^6$ (soit à un TJMA = 546), mais il peut être variable selon les simulations. L'épaisseur de la couche de base du revêtement est déterminée par un calcul de dimensionnement suivant le contexte des simulations. La couche de base peut comporter de la GB3, de l'EME1 ou de l'EME2. La structure des chaussées étudiées est présentée à la Figure 9.

Surface	BBSG1	60mm	BBSG1	60mm	BBSG1	60mm
Base	GB3	e_{refGB3}	EME1	e_{EME1}	EME2	e_{EME2}
Sol	50MPa	∞	50MPa	∞	50MPa	∞

Figure 9 - Structure type A-1

➤ **Structure type A-2**

L'épaisseur de la couche de base du revêtement est calculée par un calcul de dimensionnement et fixée à 207 mm (épaisseur de la couche de base d'EME2 calculée au §2.1.2). Le nombre d'ECAS est variable selon les simulations. La couche de base liée peut comporter de la GB3, de l'EME1, de l'EME2, de l'EME* ou de l'EME**³. La structure des chaussées étudiées est présentée dans la Figure 10.

Surface	BBSG1	60mm
Base	GB3 EME1 EME2 EME* EME**	$e_{ref,EME2}$ 207mm
Sol	50MPa	∞

Figure 10 - Structure type A-2

➤ **Structure type A-3**

La couche de base est composée uniquement d'EME2 et son épaisseur ($e_{ref,EME2}$) est fixée à 207mm. Le nombre d'ECAS (cumulé sur une période de 20ans) est fixé à $27,1 \cdot 10^6$ (TMJA = 3060). La structure de la chaussée étudiée est présentée à la Figure 11.

Surface	BBSG1	60mm
Base	EME2	$e_{ref,EME2}$ 207mm
Sol	50MPa	∞

Figure 11 - Structure type A-3

1.4.3 Structure type québécoise (type B)

La structure type B est similaire à une structure québécoise. Elle comporte un revêtement de surface (ESG10) de 60mm, une couche de base (GB20) d'épaisseur variable (déterminée par un dimensionnement via le logiciel OPECC), plusieurs couches de matériaux granulaires (MG20, MG56 et MG112) reposant sur un sol de portance 50 MPa. La structure de chaussée est présentée à la Figure 12. Le nombre d'ECAS est fixé à $27,1 \cdot 10^6$ pour un TMJA = 3060. Les paramètres complets de cette structure sont détaillés à l'annexe 1.

Surface	ESG10	60mm
Base	GB20	e_{GB20}
Granulaire	MG20	250mm 122MPa
	MG56	450mm 88MPa
	MG112	975mm 139MPa
Sol	∞	50MPa

Figure 12 – Structure type B

³ Enrobés bitumineux (EB) hypothétiques définis à la section 2.2.

Partie 2 - Définition performancielle des EME en France

En France, la notion d'EME fait référence à un enrobé dont les propriétés mécaniques sont élevées permettant l'utilisation d'une plus faible épaisseur de ce matériau dans la structure de chaussée qu'un enrobé dit « classique » comme une GB3, ici utilisée comme référence. L'utilisation d'EME en couche de base a aussi un effet sur la durée de vie de la chaussée et donc, sur le coefficient de bonification défini par l'équation [5].

2.1 Utilisation d'EME en couche de base

2.1.1 Méthodologie de la simulation

Toutes les simulations sont effectuées sur le logiciel OPECC en considérant la résistance en fatigue (fissuration de type *bottom-up*). Dans un premier temps, les simulations réalisées sont des dimensionnements simples de la Structure type A-1 à trois températures de dimensionnement θ (0°C, 15°C et 30°C). Pour un nombre d'ECAS fixé à $4.84.10^6$ (soit un TMJA = 546) et pour chaque température de dimensionnement choisie (0°C, 15°C, 30°C), l'épaisseur de la couche de base du revêtement est déterminée par un calcul de dimensionnement. Ainsi, trois épaisseurs de couche de base liées ont été obtenues suivant le matériau utilisé en couche de base ($e_{ref,GB3}$, $e_{ref,EME1}$ et $e_{ref,EME2}$). On notera que compte tenu des performances des matériaux utilisés, les épaisseurs obtenues sont classées comme : $e_{ref,GB3} > e_{ref,EME1} > e_{ref,EME2}$. Ces simulations permettent de mettre en lumière le gain d'épaisseur de la couche de base du revêtement avec l'emploi d'EME1 ou d'EME2.

Dans un second temps, l'épaisseur de la couche de base est fixée à la valeur $e_{ref,GB3}$ obtenue précédemment. L'objectif est de trouver la durée de vie (ou le nombre d'ECAS maximal) de la chaussée et ainsi déterminer le ratio de durée de vie entre une chaussée comportant une épaisseur fixée de matériaux classiques de type GB3 et une chaussée similaire comportant la même épaisseur d'EME.

2.1.2 Effets sur l'épaisseur du matériau de la couche de base

La Figure 13 présente l'épaisseur de la couche de base en fonction du matériau utilisé à chaque température de dimensionnement : 0°C, 15°C et 30°C. L'emploi d'EME (EME1 ou EME2) permet, grâce à leurs propriétés mécaniques plus élevées, de diminuer l'épaisseur de la couche de base. L'utilisation d'EME1, permet une réduction entre 5 et 12% de l'épaisseur tandis que l'EME2 permet une diminution plus conséquente de 25 à 28% par rapport à l'épaisseur de la couche de base constituée de GB3 à la température de dimensionnement considérée. À noter que les écarts les plus importants apparaissent à 30°C.

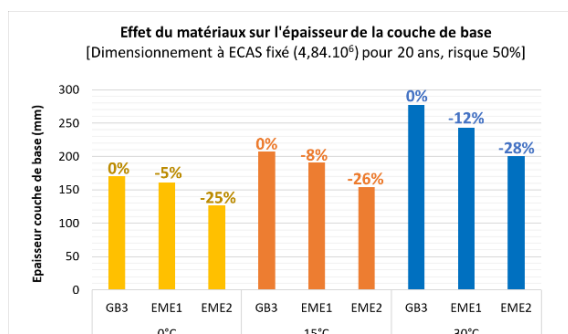


Figure 13 - Effet du matériau sur l'épaisseur de la couche de base (Simulations à P=20 ans, r=50%, ECAS=4,84.10⁶)

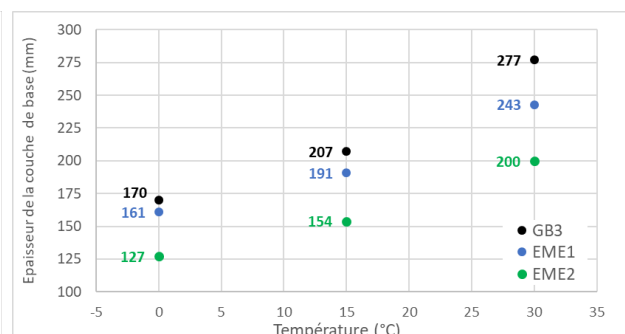


Figure 14 - Effet de la température sur l'épaisseur de la couche de base (Simulations à P=20 ans, r=50%, ECAS= 4,84.10⁶)

La Figure 14 met en valeur l'évolution de l'épaisseur de la couche de base en fonction de la température de dimensionnement et le type de matériau utilisé. En considérant une température de dimensionnement élevée, le module du matériau composant la couche de base est plus faible. Alors,

la résistance de la structure de chaussée est diminuée nécessitant une épaisseur de couche de base plus importante pour atteindre la durée de vie fixée initialement. D'autre part, la Figure 14 souligne l'enjeu des variations annuelles de température où les chaussées sont soumises à des températures à la fois très chaudes et très froides pendant plusieurs mois consécutifs. En effet, pour ce cas type, l'épaisseur de la couche de base nécessaire augmente de 107 mm pour la GB3, 82 mm pour l'EME1 et 73 mm pour l'EME2 entre les températures de dimensionnement de 0°C et 30°C, soit respectivement une augmentation de l'ordre de 163 %, 151 % et 157 %. Pendant toute sa durée de vie, la chaussée est soumise à des températures extrêmes, dont les matériaux constitutifs des différentes couches sont sensibles à la température, il est alors nécessaire de choisir finement les paramètres d'entrée dont la température de dimensionnement.

2.1.3 Effets sur la durée de vie et coefficient de bonification

À la suite des résultats de ces simulations, différents ratios ont été déterminés pour étudier l'impact de la température et des paramètres mécaniques (E , ϵ_6) des matériaux sur la durée de vie N_f^{site} de la chaussée étudiée (Structure type A). Le coefficient de bonification ou ratio de durée de vie $N_f^{site}/N_f^{site-GB3}$ rend compte du gain de la durée de vie de la chaussée comportant de l'EME par rapport à une chaussée identique où le matériau de couche de base est substitué par de la GB3. La référence $N_f^{site-GB3}$ est propre à chaque température de dimensionnement. Le Tableau 2 révèle les différents ratios de durée de vie obtenus pour ces simulations à chacune des températures de dimensionnement et à leur épaisseur correspondante.

Tableau 2 - Résultats et ratio de durée de vie

T (°C)	e = e _{refGB3} ¹ (mm)	Matériaux	ϵ_t^3 (µm/m)	N _f ^{site} (en millions)	$\frac{N_f^{site}}{N_f^{site-GB3}^2}$
0°C	170	GB3	62.0	5.06	1.00
		EME1	51.7	7.01	1.39
		EME2	51.7	26.01	5.15
15°C	207	GB3	88.5	5.03	1.00
		EME1	65.5	8.32	1.66
		EME2	65.5	30.90	6.15
30°C	277	GB3	161.2	5.08	1.00
		EME1	92.4	12.33	2.43
		EME2	92.4	45.77	9.02

¹ Epaisseur de la couche de base (en mm)
² N_f^{site-GB3} est la durée de vie maximale admissible de la chaussée constituée de GB3 à la température θ_{design} identique
³ ϵ_t est la déformation principale horizontale en dessous des matériaux bitumineux (soit de la couche d'assise)

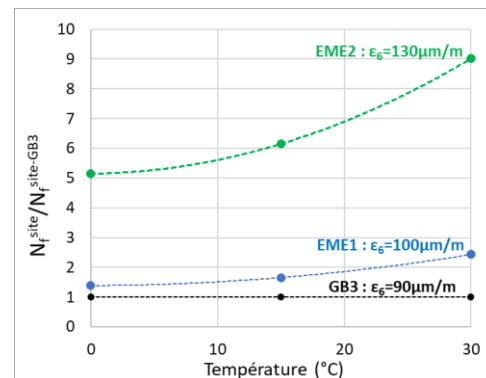


Figure 15 – Evolution du ratio de durée de vie en fonction de la température de dimensionnement (Simulations à P=20 ans, r=50%, e_{0°C}=170mm, e_{15°C}=207mm, e_{30°C}=277mm)

Ces résultats sont illustrés à la Figure 15 montrant l'évolution du ratio de vie en fonction de la température de dimensionnement pour chacun des trois matériaux utilisés en couche de base. Etant considérée comme la durée de vie de référence, l'évolution du ratio de durée de vie de la structure comportant de la GB3 en couche de base reste constante à la valeur de 1,0. En revanche, les ratios de durée de vie des structures comportant de l'EME1 et de l'EME2 augmentent avec la température. On note que le ratio de durée de vie de l'EME2 est plus élevé que celui de l'EME1. Ces deux matériaux ayant des modules identiques, cet écart est donc causé par la différence de résistance à la fatigue : valeur d' ϵ_6 .

Pour la suite, on retiendra qu'à la température de 15°C, le ratio de durée en référence à la GB3 ($N_f^{site}/N_f^{site-GB3}$) vaut :

1,66 pour l'EME1

6,15 pour l'EME2

Ainsi, à 15°C, pour la structure type considérée, pour une épaisseur de couche de base fixée à 207mm, l'utilisation d'EME2 permet à la chaussée de supporter jusqu'à 6.15 fois plus de trafic qu'avec de la GB3 en couche de base. Cette valeur va servir de pivot pour définir la notion de EME pour différents territoires.

2.2 Simulations à 5°C, 10°C et 15°C

2.2.1 Méthodologie de la simulation

Les simulations suivantes sont effectuées avec la structure de type A-3 aux températures de dimensionnement de 5°C, 10°C et 15°C. L'objectif de ces simulations est de trouver la durée de vie (ou plutôt le nombre d'ECAS) pour la structure de type A-3 comportant une couche de base de 207 mm d'EME2. Afin de pouvoir comparer les ratios de durée de vie de plusieurs enrobés connus, plusieurs matériaux non normalisés ont été intégrés en couche de base pour ces simulations.

Rappelons que l'appellation « EME » fait ici référence à des exigences spécifiques de module et de résistance à la fatigue (ϵ_6) à la température de dimensionnement de 15°C. Les enrobés utilisés en couche de base pour nos simulations seront donc désignés « EB » pour enrobé bitumineux. Les points de l'EB1 et EB2 ayant pour abscisse le module $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$ correspondent alors aux exigences normatives de l'EME1 et l'EME2. La couche de base est d'épaisseur fixée (207mm) et est alors constituée de GB3, EB1, EB2, EB* ou EB**. Les deux enrobés EB* et EB** ont les mêmes modules que les EB1 et EB2 mais une résistance à la fatigue ϵ_6 différentes : $\epsilon_{6,EB^{**}}(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})=145\mu\text{m/m}$ et $\epsilon_{6,EB^*}(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})=115\mu\text{m/m}$. Afin d'obtenir des points supplémentaires, des enrobés de modules non normalisés ont été utilisés et choisis arbitrairement en conservant le ratio $E(\theta, f)/E(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$ de l'EME2, soit les variantes B et C des enrobés (l'exhaustivité des valeurs de module est regrouper dans le Tableau 12 en annexe 1).

Il est bon de rappeler que suivant SETRA-LCPC, le coefficient de calage (k_c), propre au EME est de valeur unitaire alors qu'il est égal à 1,3 pour la GB3. En définitive, pour les simulations où une GB3 est utilisée en couche de base, la durée de vie dans OPECC est ainsi majorée d'un facteur 3,7 ($k_c^{a_2} = 1.3^5 = 3,7$ suivant les éléments de l'équation [4]). L'utilisation de GB3* (matériau fictif) permet alors de s'affranchir de ce facteur pour une comparaison qualitative des ratios de durée de vie sur les figures suivantes. Les durées de vie de référence sont toujours celles des structures comportant une couche de base de GB3.

2.2.2 Simulations à 15°C

Dans un premier temps, la température de dimensionnement considérée est uniquement de 15°C. La Figure 16, a) et b), représente l'évolution du ratio de durée de vie $N_r^{\text{site}}/N_r^{\text{site-GB3}}$ respectivement en fonction du ratio de module E/E_{GB3} ou E/E_{EME} . Seuls les deux points étiquetés « EME » possèdent les propriétés usuelles, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ et $\epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$, des EME1 et EME2 français.

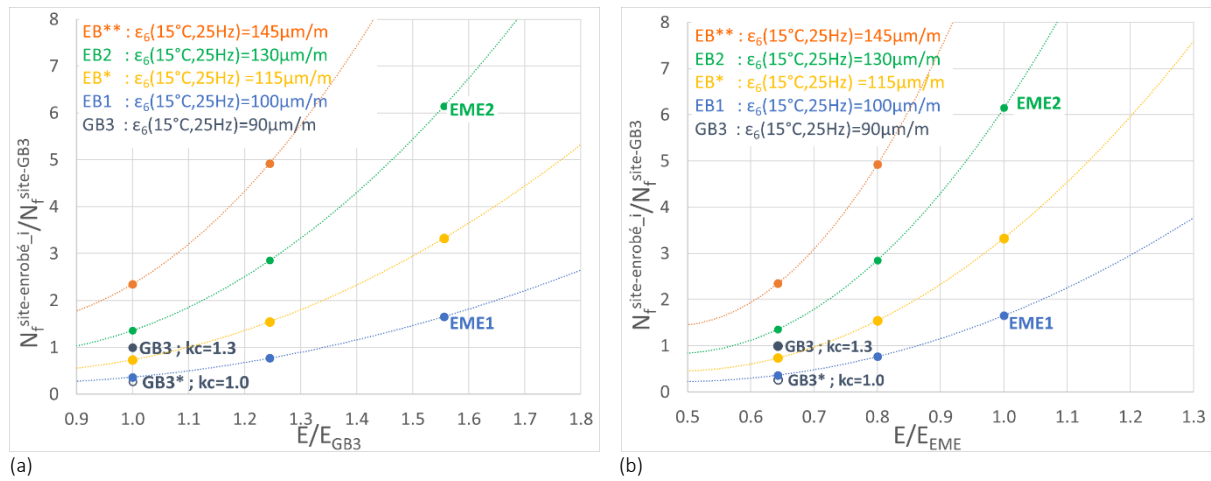


Figure 16 – Relation entre le ratio de durée de vie $N_{f,site-embobé_i} / N_{f,site-GB3}$ et du ratio des modules E/E_{ref} à 15°C
 (a) Référence $E_{GB3}(15^\circ C, 10Hz)=9000MPa$, (b) Référence $E_{EME}(15^\circ C, 10Hz)=14000MPa$
 Simulations à $\theta=15^\circ C$, $e=207mm$, $P=20$ ans, $r=50\%$, $E(15^\circ C, 10Hz)$, $N_{f,site-GB3}=5,03 \cdot 10^6$, $a_2=5$, $a_3=2.5$

A la température de dimensionnement de 15°C, il est alors possible de trouver différents couples ($E(15^\circ C, 10Hz), \epsilon_6(10^\circ C, 25Hz)$) du matériau de la couche de base d'épaisseur fixe (207 mm) pour une même durée de vie identique. A titre d'exemple, la Figure 17 met en lumière les quatre couples (E, ϵ_6) permettant d'obtenir des performances similaires pour la durée de vie $2,5N_{f,site-GB3}$: en utilisant de l'EB**, les paramètres sont ($E=9\ 170MPa, \epsilon_6=145\mu m$), en utilisant de l'EB2 ($E=10\ 790MPa, \epsilon_6=130\mu m$), en utilisant de l'EB* ($E=12\ 860MPa, \epsilon_6=115\mu m$) et en utilisant de l'EB1 ($E=15\ 900MPa, \epsilon_6=100\mu m$). Cette structure de chaussée comportant n'importe lequel des enrobés ayant un couple (E, ϵ_6) parmi ceux cités ci-dessus, aura les mêmes performances et atteindra la durée de vie $2,5N_{f,site-GB3}$. Ces couples (E, ϵ_6) sont alors équivalents car la diminution du module a été compensée par une augmentation de la résistance en fatigue ϵ_6 . Cette notion de couples équivalents est approfondie dans la partie 3 (page 27).

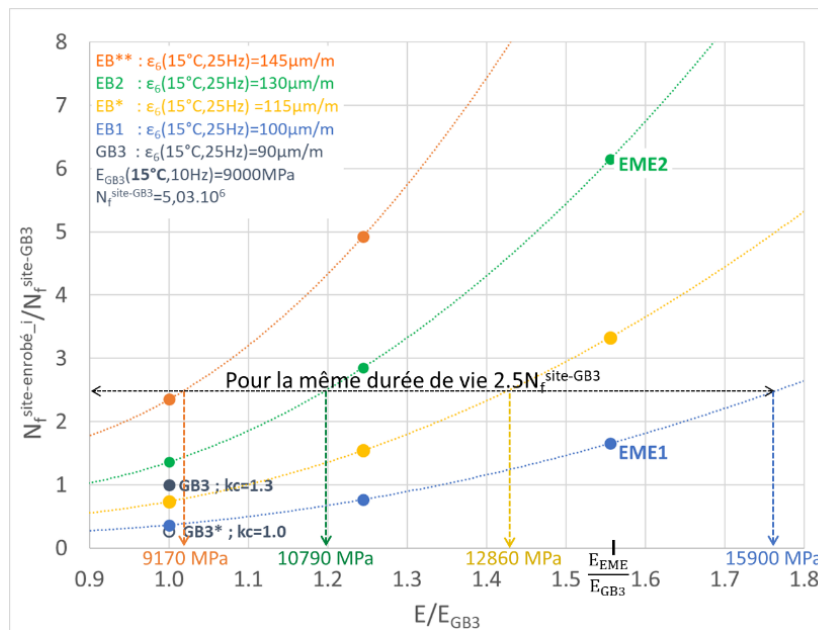


Figure 17 – Exemple de situations équivalentes selon la relation entre le ratio de durée de vie $N_{f,site-embobé_i} / N_{f,site-GB3}$ en fonction du ratio des modules
 Référence $E_{GB3}(15^\circ C, 10Hz)=9000MPa$, Simulations à $\theta=15^\circ C$, $e=207mm$, $P=20$ ans, $r=50\%$, $E(15^\circ C, 10Hz)$, $N_{f,site-GB3}=5,03 \cdot 10^6$, $a_2=5$, $a_3=2.5$

2.2.3 Simulations à 5°C, 10°C et 15°C

L'objectif actuel est de rendre compte de l'influence de la température sur le ratio de durée de vie $N_f^{site}/N_f^{site-GB3}$. Les simulations sont identiques à celles de la partie précédente en variant la température de dimensionnement θ pour 5°C et 10°C. Les simulations à 15°C déjà effectuées précédemment sont ici réutilisées. Le Tableau 3 renseigne sur les principaux résultats obtenus c'est-à-dire des ratios de durée de vie. Pour chacune des températures, la durée de vie de référence utilisée dans le calcul du ratio $N_f^{site}/N_f^{site-GB3}$ est celle de la structure comportant du GB3 ($k_c=1.3$) à la température considérée.

Quand la température de dimensionnement augmente, comme l'épaisseur de la couche de base reste identique (207 mm), la durée de vie de la chaussée diminue car les modules des enrobés, et donc la capacité portante de la structure de chaussée, diminue. Les résultats, présentés dans le Tableau 3, montrent ainsi que, lorsque la température augmente, la durée de vie de la chaussée diminue de 31% (multipliée par 0.69) entre 5°C et 10°C puis de 32% (multiplié par 0,68) entre 10°C et 15°C pour les structures comportant de l'EME (EME1, EME*, EME2 et EME**) en couche de base. Pour la structure de référence en GB3, la diminution de la durée de vie est plus importante, soit de 35% entre 5°C et 10°C et 36% entre 10°C et 15°C. A quelle facteur cette diminution est-elle due ?

Tableau 3 - Résultats et ratio de durée de vie des simulations à 5°C, 10°C et 15°C
 Simulations à 5°C, 10°C et 15°C, e=207mm, P=20 ans, r=50%, $E(\theta^\circ C, 10Hz)$, $a_2=5$, $a_3=2.5$

Enrobé en couche de base	5°C				10°C				15°C			
	$E(5^\circ C)/E_{GB3}(5^\circ C)^1$	ϵ_t^3 (µm/m)	$N_f^{site}(10^6)$	$N_f^{site}/N_f^{site-GB3\ 2}$	$E(10^\circ C)/E_{GB3}(10^\circ C)^1$	ϵ_t^3 (µm/m)	$N_f^{site}(10^6)$	$N_f^{site}/N_f^{site-GB3\ 2}$	$E(15^\circ C)/E_{GB3}(15^\circ C)^1$	ϵ_t^3 (µm/m)	$N_f^{site}(10^6)$	$N_f^{site}/N_f^{site-GB3\ 2}$
GB3	1.0	57.4	11.98	1.00	1.0	70.5	7.80	1.00	1.0	88.5	5.03	1.00
GB3*	1.0	57.4	3.23	0.27	1.0	70.5	2.10	0.27	1.0	88.5	1.35	0.27
EB1	1.4	46.6	17.67	1.48	1.4	55.3	12.02	1.54	1.6	65.5	8.32	1.66
EB2	1.4	46.6	65.61	5.48	1.4	55.3	44.64	5.72	1.6	65.5	30.90	6.15
EB*	1.4	46.6	35.54	2.97	1.4	55.3	24.18	3.10	1.6	65.5	16.74	3.33
EB**	1.4	46.6	113.26	9.46	1.4	55.3	77.06	9.88	1.6	65.5	53.34	10.61

¹ Base de données Alize (Norme NF P98-086 annexe F normative)
² $N_f^{site-GB3}$ est la durée de vie maximale admissible de la chaussée constituée de GB3 à la température θ considérée
³ ϵ_t est la déformation principale horizontale en dessous des matériaux bitumineux (soit de la couche de base)

Pour y répondre, il est nécessaire d'analyser l'équation [4] qui sert au calcul de la durée de vie

$$N_f^{site} = k_r^{a_2} \cdot (k_c \cdot k_s)^{a_2} \cdot N_{f1}(\theta_{test}, f_{test}) [E(\theta_{test}, f_{test})]^{a_3} \cdot E(\theta, f)^{-a_3} \cdot \epsilon_t^{-a_2}$$

Les coefficients en noir sont invariants dans le cadre de cette simulation, et n'ont a priori aucune incidence sur la variation des ratios de durée de vie. En revanche, le module de l'enrobé de la couche de base $E(\theta, f)$ à la température de dimensionnement ainsi que la déformation principale horizontale ϵ_t au bas du revêtement, sont amenés à varier selon les simulations étudiées.

Pour une structure comportant le même matériau en couche de base, lorsque la température de dimensionnement augmente, le module $E(\theta, f)$ du matériau diminue, donc comme $a_3 > 0$, le coefficient $E(\theta, f)^{-a_3}$ augmente. Pour ces simulations, l'ordre de grandeur de la valeur du facteur $E(\theta, f)^{-a_3}$ est de 10^{-11} . De même, lorsque la température de dimensionnement augmente, la déformation principale horizontale ϵ_t augmente, donc, comme $a_2 > 0$, la valeur du facteur $\epsilon_t^{-a_2}$ diminue. Pour ces simulations, l'ordre de grandeur du facteur $\epsilon_t^{-a_2}$ est de 10^{20} . Donc, la durée de vie N_f^{site} diminue quand la température augmente et la variation de la déformation horizontale principale ϵ_t est prédominante sur la variation de module.

Or, bien que la durée de vie de référence $N_f^{\text{site-GB3}}$ soit propre à chaque température de dimensionnement, et contrairement à la diminution de la durée de vie N_f^{site} , les ratios de durée de vie augmentent quand la température de dimensionnement augmente. En effet, comme la diminution de la durée de vie des structures de référence comportant de la GB3 en couche de base est plus importante, l'écart entre la structure de référence et celle comportant des EME augmente de façon plus significative avec la température. Il est alors logique que les ratios de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-GB3}}$ augmentent quand la température augmente. Cette augmentation est visible sur la Figure 18 représentant la relation entre le ratio de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-GB3}}$ et le ratio des modules E/E_{EME} et E/E_{GB3} . La référence $N_f^{\text{site-GB3}}$ est définie pour chacune des trois températures de dimensionnement.

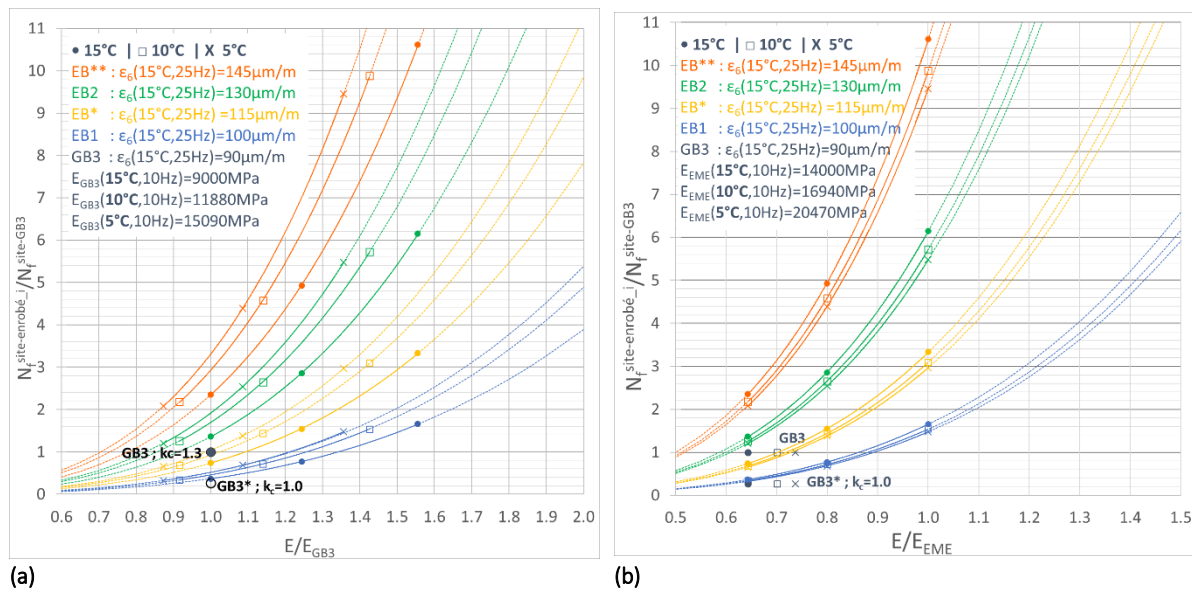


Figure 18 – Variation du ratio de durée de vie $N_f^{\text{site}}/N_f^{\text{site-ref}}$ en fonction du ratio des modules E/E_{ref}
 (a) Référence $E_{\text{GB3}}(\theta^\circ\text{C}), 10\text{Hz}$, (b) Référence $E_{\text{EME}}(\theta^\circ\text{C}), 10\text{Hz}$, Simulations à 5°C, 10°C et 15°C, $e=207\text{mm}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$,
 $E(\theta^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$, $a_2=5$, $a_3=2.5$, $N_f^{\text{site-GB3}}(5^\circ\text{C})=5.03 \cdot 10^6$, $N_f^{\text{site-GB3}}(10^\circ\text{C})=7.80 \cdot 10^6$, $N_f^{\text{site-GB3}}(15^\circ\text{C})=11,98 \cdot 10^6$

2.2.4 Comparaison du ratio $N_f^{\text{site}} / N_f^{\text{site-GB3}}$ de différents enrobés

Il est maintenant possible d'identifier et de comparer les ratios de durée de vie des structures de chaussées comportant des enrobés en couche de base respectant différentes exigences quant aux valeurs du couple (E, ϵ_6) et c_e , à des températures différentes. La Figure 19 met en valeur les performances des structures de chaussées comportant des enrobés dont les exigences de module $E(\theta, f)$ sont définies dans le Tableau 4.

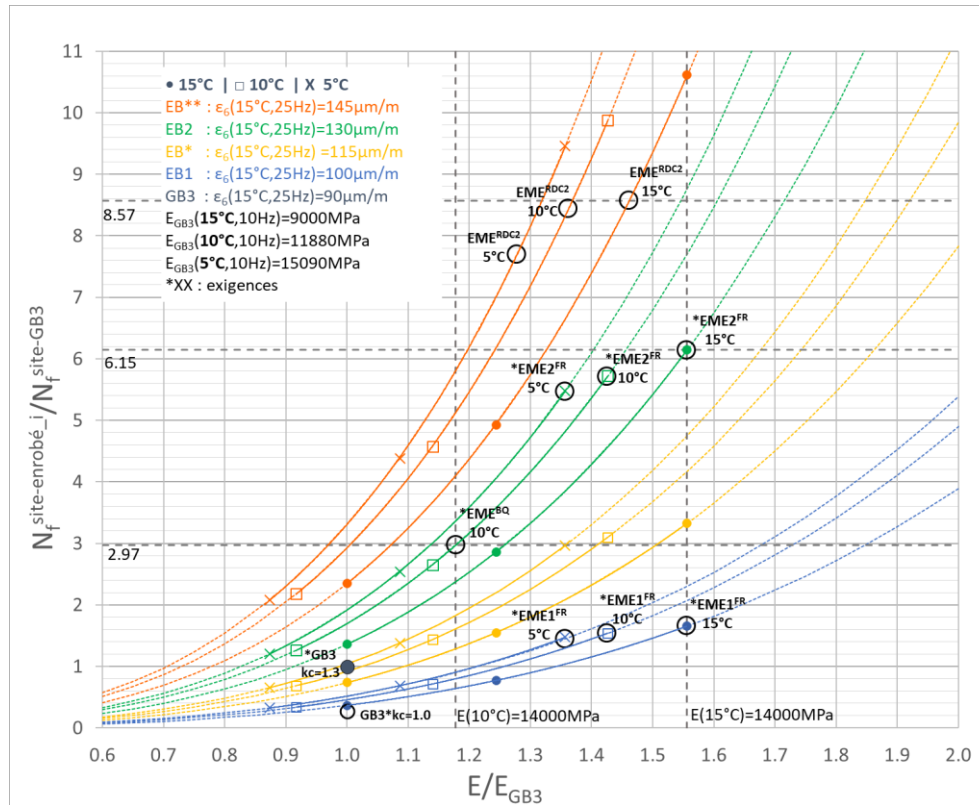
Tableau 4 - Exigences des enrobés comparés

*GB3 ^{FR}	Exigences française (Norme NF P98-086 annexe F normative) Voir Tableau 12 en annexe 1
*EME1 ^{FR}	
*EME2 ^{FR}	
*EME ^{BQ}	$E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$ (Exigences Bitume Québec)
EME ^{RDC2}	$E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=13\ 157\text{MPa}$; $E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=16\ 185\text{MPa}$; $E(5^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=19\ 288\text{MPa}$

*Exigence minimales

Ainsi, avec un module $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$ (soit un ratio $E/E_{\text{GB3}, 15^\circ\text{C}}=1.556$) et une résistance à la fatigue avec $\epsilon_6 = 130\mu\text{m/m}$ (courbes vertes), la structure de chaussée étudiée comportant de l'EME2 en couche de base atteint un ratio de durée de vie de 6,15 (Figure 19). La structure similaire comportant de l'EME^{BQ}, enrobé ayant un module $E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$ (soit un ratio $E/E_{\text{GB3}, 10^\circ\text{C}}=1.178$) et une résistance à la fatigue avec $\epsilon_6 = 130\mu\text{m/m}$ (courbes jaunes), n'atteint

qu'un ratio de durée de vie que de 2,97. Cependant, en augmentant la résistance à la fatigue de l'enrobé EME^{BQ} à $\epsilon_6 = 145\mu\text{m/m}$, le ratio de durée de vie de la structure de chaussée atteint alors 5,13. L'enrobé EME^{RDC2} étudié dans le projet RDC2 permet à la structure de chaussée d'atteindre un ratio de durée de vie de 8,57 pour la température de dimensionnement de 15°C, valeur nettement supérieure à celle correspondante pour l'EME2 français (ratio de 6,15)



2.3 Conclusion et perspectives

Ainsi, à la température de dimensionnement de 15°C, l'EME2, tel que défini en France, permet de diminuer l'épaisseur de la couche de base de 26% par rapport à l'utilisation de GB3. L'utilisation d'EME en couche de base a aussi un effet sur le ratio de durée de vie de la chaussée établi en référence à la GB3, lequel est impacté selon la température de dimensionnement considérée. Compte tenu des différences de températures entre les cycles de températures moyennes française et canadienne, la question de la température de dimensionnement se pose à l'image du ratio de durée de vie de l'EME^{FR} (dont l'exigence du module est 14 000MPa définie à 15°C) qui est proche du double de celui l'EME^{BQ} (dont l'exigence du module est 14 000MPa définie à 10°C).

Partie 3 - Equivalence des couples Module/Résistance à la fatigue

Les simulations précédentes (partie 2) ont permis de mettre en avant des relations performanciennes entre le module E et la résistance en fatigue ϵ_6 pour une même durée de vie. L'objectif de cette partie est de rendre compte de l'existence de couples (E, ϵ_6) équivalents en termes de performance et de durée de vie à l'utilisation de l'EME2 en couche de base. Toutes les simulations sont effectuées sur le logiciel OPECC en considérant la résistance en fatigue (fissuration de type *bottom-up*) et à la température de dimensionnement 15°C.

3.1 Courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6)

Les simulations suivantes sont effectuées avec la Structure type A-3 (page 19) à la température de dimensionnement $\theta=15^\circ\text{C}$ pour la durée de vie $N_{f,site}=N_{f,site-EME2}=30,9.10^6$. En fixant l'épaisseur de la couche de base à $e=e_{ref,EME2}=207\text{mm}$, pour chaque valeur de module E, la valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ est recherchée afin que la structure soit dimensionnée pour la durée de vie considérée. La valeur de la résistance à la fatigue ϵ_6 correspondante est alors calculée suivant l'équation [3]. La Figure 20 représente le ratio de la résistance à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2}$ en fonction du ratio des modules $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})/E_{EME2}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$. Trois couples (E, ϵ_6) équivalents à celui de l'EME2 sont donnés à titre d'exemple sur cette Figure 20. Ainsi, en remplaçant l'EME2 de la structure type étudiée ici par un enrobé de couple (E, ϵ_6) se situant sur cette courbe, la durée de vie de la chaussée restera identique.

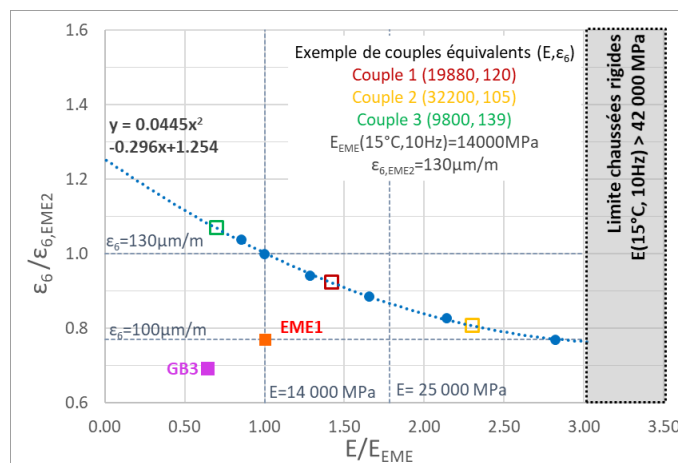


Figure 20 – Courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 (Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$, structure type A-3, $e=207\text{mm}$, $N_{f,site}=30,9.10^6$, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$)

Cette courbe d'équivalence modélisant tous les couples (E, ϵ_6) équivalents à celui de l'EME2 en termes de performance permet alors de délimiter deux zones de performances (Figure 21). Les matériaux dont le couple (E, ϵ_6) se trouvent au-dessus de la courbe d'équivalence ont des propriétés performanciennes supérieures à celles de l'EME2 puisqu'à épaisseur de couche de base identique, ces propriétés permettront d'obtenir une durée de vie plus importante. La structure est alors surdimensionnée par rapport à la structure constituée d'EME2 en couche de base. Inversement, les matériaux dont le couple (E, ϵ_6) se trouvent en-dessous de la courbe d'équivalence ont des propriétés performanciennes inférieures à celles de l'EME2 puisqu'à épaisseur de couche de base identique, ces propriétés permettront d'obtenir une durée de vie plus faible par rapport à la structure incorporant l'EME2. La structure est alors sous dimensionnée par rapport à la structure composée d'EME2 en couche de base.

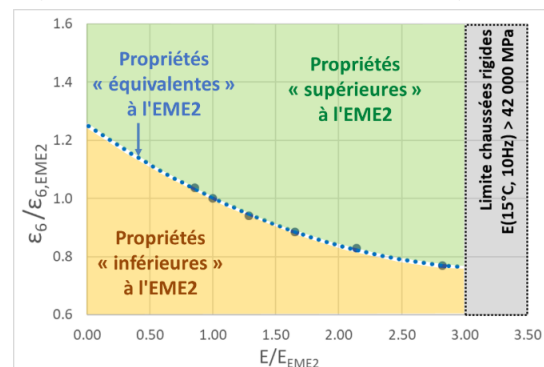


Figure 21 - Zones de performance de la courbe d'équivalence (Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$, structure type A-3, $e=207\text{m}$, $N_{f,site}=30,9.10^6$, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$)

Il est ensuite possible de connaître les améliorations à apporter au couple (E, ϵ_6) d'un matériau pour qu'il acquiert les propriétés performanciennes de l'EME2 et que la structure de chaussée atteigne la durée de vie fixée. A titre d'exemple, la Figure 22 montre que la structure de type A-3 comportant, en couche de base, un enrobé de couple $(E=10\ 500\text{MPa}, \epsilon_6=104\mu\text{m/m})$, valeurs choisies arbitrairement, peut atteindre la durée de vie de l'EME2, soit en augmentant uniquement son module à $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=22\ 590\text{MPa}$ (flèche horizontale sur la Figure 22), soit en augmentant uniquement sa résistance à la fatigue à $\epsilon_6=138\mu\text{m/m}$ (flèche verticale sur la Figure 22). Une solution intermédiaire peut être d'augmenter les deux paramètres du couple (E, ϵ_6) pour atteindre un point de la courbe d'équivalence. Par exemple, la Figure 22 indique que le couple $(E=18\ 000\text{MPa}, \epsilon_6=122\mu\text{m/m})$ est un couple solution pour la structure étudiée à la durée de vie fixée (flèche en biais sur la Figure 22).

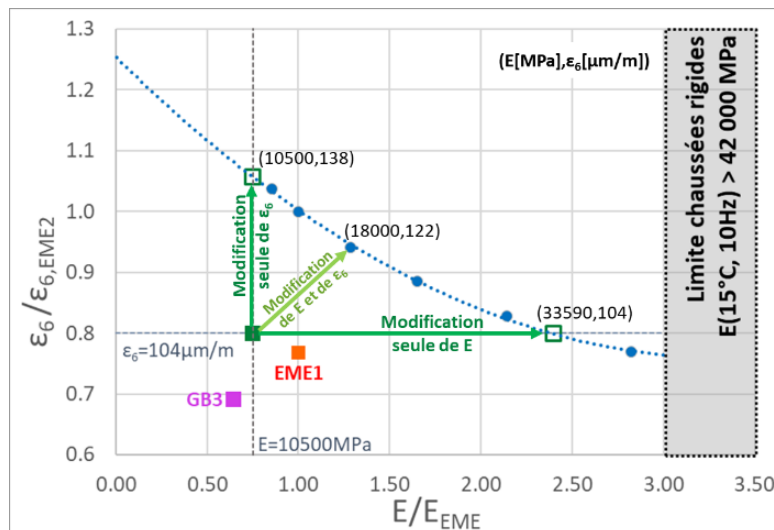


Figure 22 - Exemple de modifications du couple (E, ϵ_6) pour atteindre les performances de l'EME2 (Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$, structure type A-3, $e=207\text{mm}$, $N_f^{\text{site}}=30,9 \cdot 10^6$, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$)

3.2 Impact de la durée de vie N_f^{site}

Dans un second temps, pour chaque durée de vie multiple de N_f^{site} ($0,5N_f^{\text{site}}$, N_f^{site} , $2N_f^{\text{site}}$ et $5N_f^{\text{site}}$), l'épaisseur de la couche de base de la structure de type A-3 est déterminée par un calcul de dimensionnement via le logiciel OPECC en considérant l'EME2 ($E_{\text{EME2}}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$ et $\epsilon_{6,\text{EME2}}(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})=130\mu\text{m/m}$) en couche de base à la température de dimensionnement $\theta=15^\circ\text{C}$. Les épaisseurs trouvées pour chacune des durées de vies multiples de N_f^{site} sont respectivement 185mm ($0,5N_f^{\text{site}}$), 207mm (N_f^{site}), 231mm ($2N_f^{\text{site}}$) et 264mm ($5N_f^{\text{site}}$). Pour plusieurs valeurs du module de l'enrobé de couche de base, l'objectif est alors de trouver la valeur $N_{f1}(\theta_{\text{test}}, f_{\text{test}})$ permettant d'atteindre la durée de vie multiple de N_f^{site} , puis de calculer la valeur de la résistance à la fatigue ϵ_6 grâce à l'équation [3] pour établir la courbe d'équivalence correspondante.

La Figure 23 représente le ratio de la résistance à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,\text{EME2}}$ en fonction du ratio des modules E/E_{EME} pour chacune des durées de vie avec leur épaisseur correspondante. L'ensemble de ces courbes d'équivalence des couples (E, ϵ_6) mettent en valeur un fuseau de couples (E, ϵ_6) équivalents pour une épaisseur de couche de base dimensionnée répondant à une durée de vie multiple de N_f^{site} . Entre les bornes de ce fuseau délimité par des courbes en pointillés, la durée de vie est multipliée par un facteur de 10. La borne supérieure du fuseau regroupe tous les couples (E, ϵ_6) aux propriétés équivalentes en termes de durée de vie à celles d'une structure comportant 264mm d'EME2 en couche de base pour une durée de vie maximale de $5N_f^{\text{site}}$. Tous les enrobés dont les couples (E, ϵ_6) se trouvent au-dessus de cette courbe, et donc du fuseau, ont des propriétés supérieures à celles de l'EME2 et permettent d'obtenir une durée de vie de la structure de chaussée

supérieure pour cette même épaisseur de couche de base ou inversement, une épaisseur plus faible pour cette durée de vie $5N_f^{site}$. La borne inférieure du fuseau regroupe tous les couples (E, ϵ_6) aux propriétés équivalentes en termes de durée de vie à celles d'une structure comportant 185mm d'EME2 en couche de base pour une durée de vie maximale de $0,5N_f^{site}$. Tous les enrobés dont les couples (E, ϵ_6) se trouvent en-dessous de cette borne, et donc du fuseau, ont des propriétés inférieures à celles de l'EME2 et engendrent une durée de vie de la structure de chaussée plus faible pour cette même épaisseur de couche base.

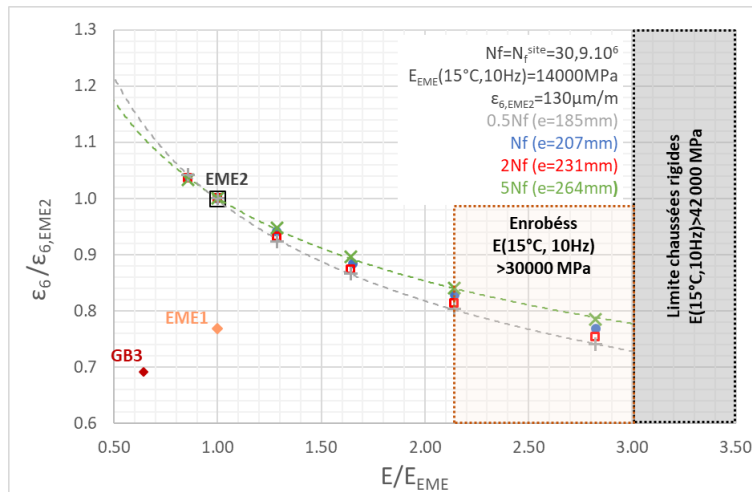


Figure 23 – Impact de la durée de vie sur la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 (Simulations à $\theta=15^\circ C$, structure type A-3, $P=20ans$, $r=50\%$, $N_f^{site}=30,9 \cdot 10^6$, $E(15^\circ C, 10Hz)$)

La courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) est-elle indépendante de la durée de vie fixée (ici, un multiple de N_f^{site})? La Figure 24 met en valeur la largeur du fuseau entre les courbes d'équivalence $0,5 N_f^{site}$ et $5 N_f^{site}$ pour chaque point de mesure de la Figure 23. La largeur du fuseau représente 5% de la valeur ϵ_6 centrée. L'écart le plus important est pour des enrobés de modules 39 500MPa, ce qui est relativement rare. Compte tenu de la faible largeur de ce fuseau, en considérant le fait qu'entre les deux bornes du fuseau, la durée de vie de la chaussée est multipliée par 10, il est possible de dire que, pour cette structure et dans le cadre de cet exemple, la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) présente une certaine indépendance vis-à-vis de la durée de vie fixée et de l'épaisseur de dimensionnement de la couche de base du revêtement.

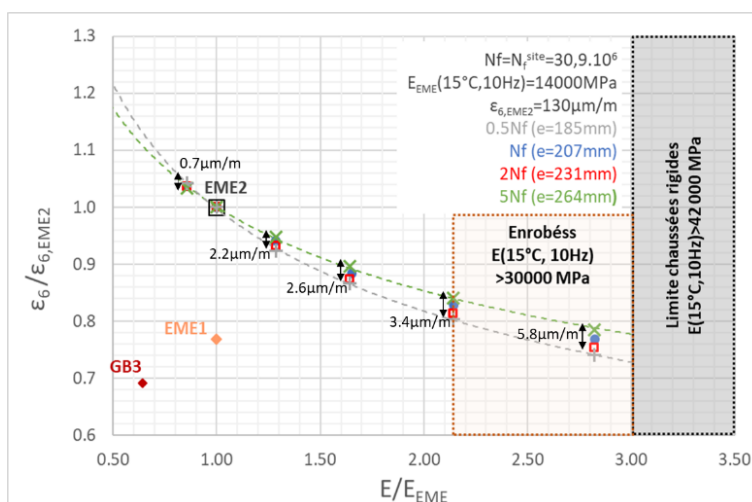


Figure 24 – Précisions sur la largeur du fuseau défini à la Figure 23 (Simulations à $\theta=15^\circ C$, structure type A-3, $P=20ans$, $r=50\%$, $N_f^{site}=30,9 \cdot 10^6$, $E(15^\circ C, 10Hz)$)

3.3 Impact de la pente de fatigue a_2

Afin de rendre compte de l'impact de la pente de fatigue, la valeur de a_2 , sur la relation entre le ratio des modules E/E_{EME} et le ratio des résistances à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2}$, trois structures semblables à la structure type A-3 ont été étudiées (Figure 25). Dans chaque cas, la durée de vie $N_{f,site}=30,9.10^6$ et est identique à celle de la structure de référence comportant de l'EME2 en couche de base. En effet, la couche de base de la 1^{ère} structure est constituée de 207mm d'EME2 dont la pente de fatigue vaut 5 (AFNOR, 2011). Les deux autres structures sont composées d'un matériau aux paramètres mécaniques identiques à ceux de l'EME2, exceptée que la valeur de la pente de fatigue vaut 4 ou 4,5 (valeurs plus fréquentes au Québec pour des enrobés non modifiés). Dans un premier temps, la valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ établie avec OPECC est utilisée pour calculer suivant l'équation [3] avec la valeur a_2 correspondante afin d'obtenir la résistance à la fatigue avec $\epsilon_6=130\mu\text{m/m}$ correspondant au module de $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\ 000\text{MPa}$.

Surface	BBSG1 60mm	BBSG1 60mm	BBSG1 60mm
Base	EME2 - 207mm $a_2=5$ $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})=3,713.10^{-14}$	«EB2» - 216mm $a_2=4.5$ $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})=3,256.10^{-12}$	«EB2» - 229mm $a_2=4$ $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})=2,856.10^{-10}$
Sol	50MPa ∞	50MPa ∞	50MPa ∞

Figure 25 – Structures types étudiées pour connaître l'impact de la pente a_2

Le calcul de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ impact la position du point pivot dans la représentation des droites de Wöhler dans l'espace $\log(N_f) - \log(\epsilon_0)$. Le point pivot est alors placé à la valeur de $\log(\epsilon_6)$ en abscisse pour toutes les valeurs de pente. La Figure 26 représente les droites de fatigue des structures étudiées ayant différentes valeurs de a_2 . La structure de référence ayant la pente $a_2=5$ est la droite la plus pentue (droite bleue) avec la valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ la plus faible : $3,713.10^{-14}$. Inversement la structure ayant une pente $a_2=4$ est la moins pentue (droite verte) avec la valeur de $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ la plus élevée : $2,856.10^{-10}$.

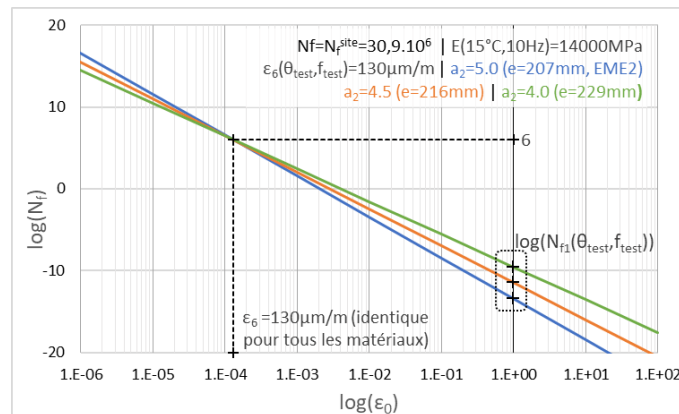


Figure 26 - Représentation des droites de Wöhler dans l'espace $\log(N_f) - \log(\epsilon_0)$ pour différentes valeurs de a_2

Dans un second temps, pour chaque valeur de a_2 (5 ; 4,5 ; 4), l'épaisseur de la couche de base (respectivement de 207mm ($a_2=5$), 216mm ($a_2=4,5$) et 229mm ($a_2=4$), tel que présentée à la Figure 25) est déterminée par un calcul de dimensionnement via le logiciel OPECC en considérant le couple ($E=14\ 000\text{MPa}$; $\epsilon_6=130\mu\text{m/m}$) pour le matériau en couche de base à la température de dimensionnement de 15°C . Pour plusieurs valeurs du module de l'enrobé de couche de base, l'objectif est ensuite de trouver la valeur $N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$ permettant d'atteindre la durée de vie multiple de $N_{f,site}$, puis de calculer la valeur de la résistance à la fatigue ϵ_6 grâce à la relation [3] pour établir la courbe d'équivalence correspondante.

La Figure 27 représente les relations entre le ratio de la résistance à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2}$ et le ratio des modules E/E_{EME} pour chacune des valeurs de pente a_2 . Ces courbes d'équivalence permettent de mettre en valeur un fuseau de couples (E, ϵ_6) équivalents pour une épaisseur de couche de base dimensionnée pour une valeur de pente a_2 et une durée de vie N_f^{site} . Entre les bornes deux de ce fuseau, la pente a_2 varie entre 4 et 5.

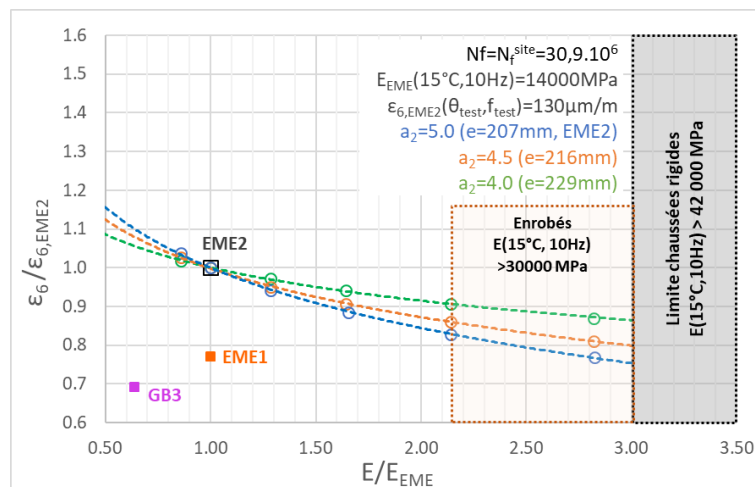


Figure 27 – Impact de la pente a_2 sur la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 (Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$, $e=207\text{mm}$, structure type A-3, $N_f^{site}=30,9.10^6$, $E(15^\circ\text{C},10\text{Hz})$)

La courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) est indépendante de la pente a_2 pour une durée de vie fixée N_f^{site} ? La Figure 28 met en valeur la largeur du fuseau entre les courbes d'équivalence $a_2=4$, $a_2=4.5$ et $a_2=5$ pour chaque point calculé à la Figure 23. La largeur du fuseau ne représente pas plus de $10\mu\text{m}/\text{m}$ pour les enrobés dont les modules $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz}) > 30\,000\text{MPa}$. Cet écart est encore plus important pour des enrobés de module 39500MPa , mais qui restent relativement rares. Compte tenu de la faible largeur de ce fuseau en considérant le fait qu'entre les deux bornes de ce fuseau la pente a_2 varie entre 4 et 5, pour des enrobés non modifiés, il est possible de dire que, pour cette structure et dans le cadre de cet exemple, la courbe d'équivalence des couples (E, ϵ_6) présente une certaine indépendance vis-à-vis de la pente de fatigue a_2 . En revanche, si la courbe d'équivalence semble peu varier pour ces valeurs de pente a_2 , l'addition de plusieurs sources d'incertitudes (indépendance face à la durée de vie et face à la pente de fatigue présentée ici) quant à la valeur de ϵ_6 peut diminuer la durée de vie de la chaussée considérée et ne pas lui permettre d'atteindre les performances de l'EME2 en termes de durée de vie.

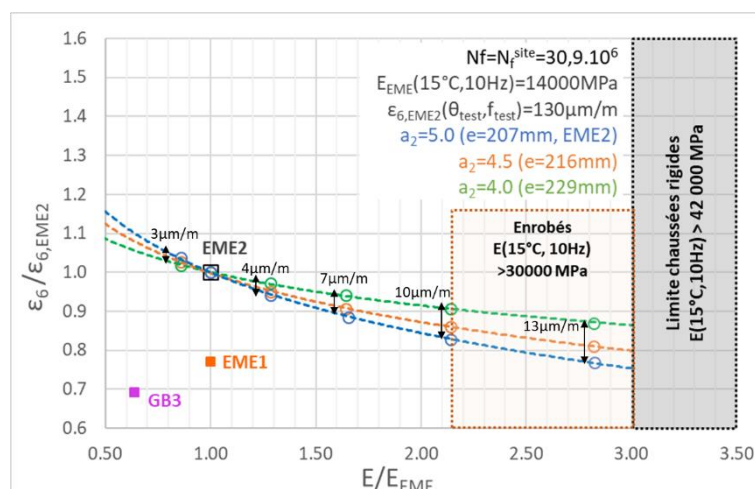


Figure 28 – Précision sur la largeur du fuseau défini à la Figure 27 (Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20\text{ans}$, $r=50\%$, $e=207\text{m}$, structure type A-3, $N_f^{site}=30,9.10^6$, $E(15^\circ\text{C},10\text{Hz})$)

3.4 Duplication des courbes d'équivalence selon αN_f^{site} et $\beta \epsilon_{ref}$

3.4.1 Epaisseur fixée : duplication des courbes d'équivalence selon αN_f^{site}

Pour chaque durée de vie multiple de N_f^{site} ($0.5N_f^{site}$, $1.5N_f^{site}$, $2N_f^{site}$ et $5N_f^{site}$), tout en conservant l'épaisseur de la couche de base à $e_{ref} = 207\text{mm}$, la courbe d'équivalence du couple (E, ϵ_6) est déterminée suivant la même méthode définie précédemment dans la section 3.1. La Figure 29 représente le ratio de la résistance à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,GB3}$ ou $\epsilon_6/\epsilon_{6,EME}$ en fonction du ratio des modules $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})/E_{GB3}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ ou $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})/E_{EME}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ pour chacune de ces durées de vie étudiées.

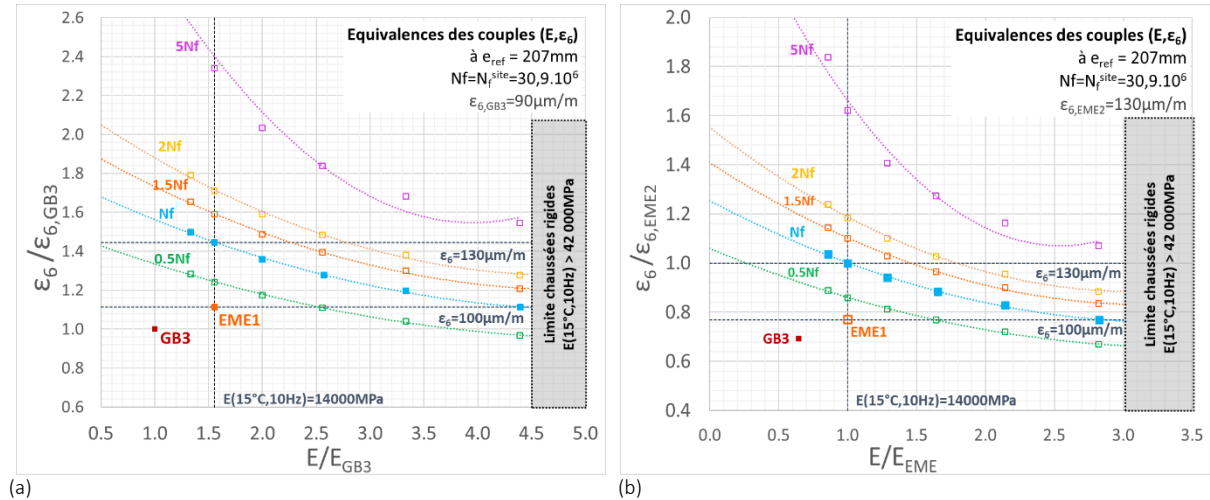


Figure 29 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 pour $e=207\text{mm}$ fixée
 (a) Référence $E_{GB3}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=9000\text{MPa}$, (b) Référence $E_{EME}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14000\text{MPa}$, Simulations à $\theta=15^\circ\text{C}$, $P=20$ ans, $r=50\%$, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$, $e_{ref}=207\text{mm}$, $\epsilon_{6,GB3}=90\mu\text{m/m}$, $\epsilon_{6,EME2}=130\mu\text{m/m}$, $a_2=5$, $a_3=2.5$, $N_f^{site}=30,9 \cdot 10^6$, $0,5N_f^{site} \approx 15,5 \cdot 10^6$, $1,5N_f^{site} \approx 46,4 \cdot 10^6$, $2,0N_f^{site} \approx 61,8 \cdot 10^6$, $5,0N_f^{site} \approx 154,5 \cdot 10^6$

La Figure 30 montre un exemple d'analyse qu'il est possible de réaliser avec les courbes d'équivalences obtenues précédemment en ayant fixé l'épaisseur de la couche de base pour des durées de vie multiples de N_f^{site} . En considérant une valeur arbitraire pour la résistance à la fatigue ϵ_6 , ici $\epsilon_6=130\mu\text{m/m}$, augmenter le module E du matériau de la couche de base permet de compenser l'augmentation de la durée de vie de la chaussée considérée (flèche horizontale). Ainsi, une hausse de module entre $21\,300\text{MPa}$ ($E/E_{EME}=1,45$) et $25\,200\text{MPa}$ ($E/E_{EME}=1,80$), permet de doubler la durée de vie de la chaussée par rapport à la durée de vie de référence ($N_f^{site} = 30,9 \cdot 10^6$). Pour un module fixé

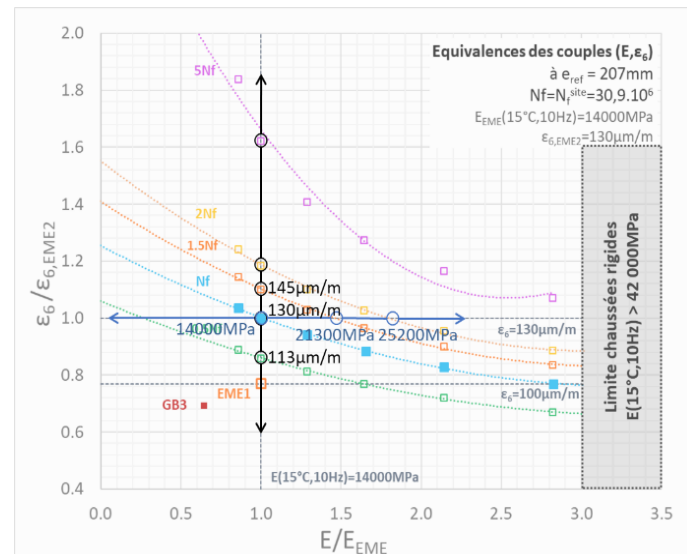


Figure 30 - Exemple d'analyse des courbes d'équivalences à épaisseur de couche de base fixée

arbitrairement à $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})=14\,000\text{MPa}$, il est aussi possible de faire varier la résistance à la fatigue ϵ_6 et obtenir différentes durées de vie multiples de N_f^{site} (flèche verticale) pour la même épaisseur de couche de base fixée. Ainsi, une augmentation de la valeur de la résistance à la fatigue ϵ_6 entre $113\mu\text{m/m}$ ($\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2} = 0,87$) à $145\mu\text{m/m}$ ($\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2} = 1,12$) triple la durée de vie qui passe alors de $0,5N_f^{site}$ à $1,5N_f^{site}$ dans le cas type étudié et évite une augmentation conséquente de l'épaisseur de la couche de base nécessaire pour compenser cette augmentation de durée de vie tout en permettant ainsi une économie de matériaux.

3.4.2 Durée de vie fixée : duplication des courbes d'équivalence selon $\beta_{e_{ref}}$

Pour chaque épaisseur de couche de base multiple de l'épaisseur de couche de base e_{ref} ($0,80 e_{ref}$, $0,90 e_{ref}$, $0,95 e_{ref}$, $1,10 e_{ref}$, $1,20 e_{ref}$ et $1,50 e_{ref}$), tout en fixant la même durée de vie de la chaussée à $N_{f_{site}} = 30,9 \cdot 10^6$, la courbe d'équivalence du couple (E, ϵ_6) est déterminée suivant la même méthode suivie précédemment. La Figure 31 représente le ratio de la résistance à la fatigue $\epsilon_6/\epsilon_{6,GB3}$ OU $\epsilon_6/\epsilon_{6,EME}$ en fonction du ratio des modules $E(15^\circ C, 10Hz)/E_{GB3}(15^\circ C, 10Hz)$ ou $E(15^\circ C, 10Hz)/E_{EME}(15^\circ C, 10Hz)$ pour chacune des épaisseurs de couche de base considérée.

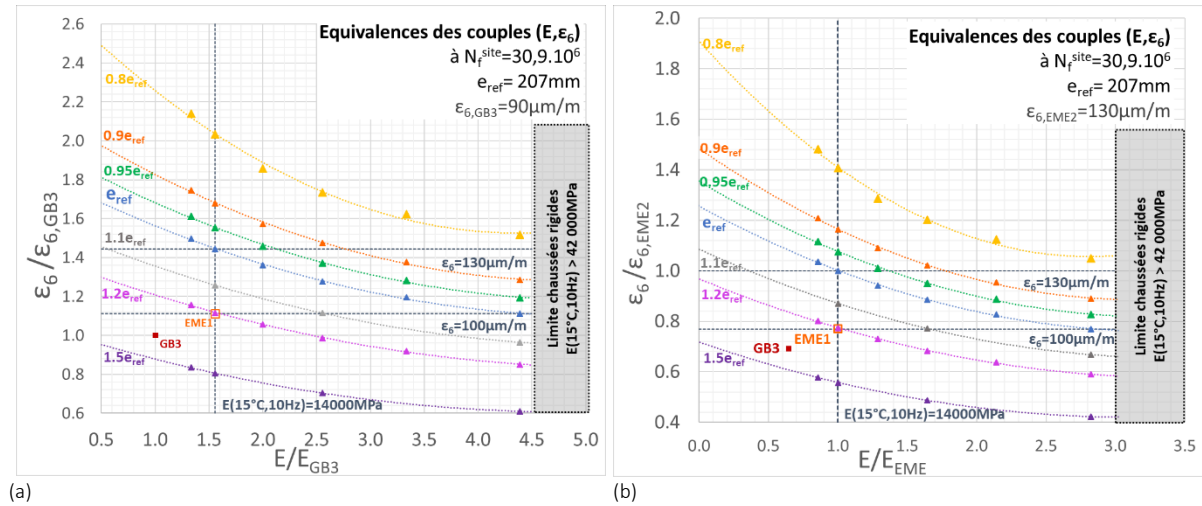


Figure 31 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME pour $N_{f_{site}} = 27,1 \cdot 10^6$
 (a) Référence $E_{GB3}(15^\circ C, 10Hz) = 9000MPa$, (b) à Référence $E_{EME}(15^\circ C, 10Hz) = 14000MPa$, Simulations $\theta = 15^\circ C$, $P = 20$ ans, $r = 50\%$, $E(15^\circ C, 10Hz)$, $N_{f_{site}} = 30,9 \cdot 10^6$, $\epsilon_{6,GB3} = 90\mu m/m$, $\epsilon_{6,EME2} = 130\mu m/m$, $a_2 = 5$, $a_3 = 2,5$, $e_{ref} = 207mm$, $0,8e_{ref} = 166mm$, $0,9e_{ref} = 197mm$, $0,95e_{ref} = 187mm$, $1,1e_{ref} = 228mm$, $1,2e_{ref} = 248mm$, $e_{ref} = 311mm$

La Figure 32 montre un exemple d'analyse qu'il est possible de réaliser avec les courbes d'équivalences obtenues à la Figure 31 pour une durée de vie fixée et des épaisseurs de couche de base multiples de e_{ref} . En fixant arbitrairement une valeur pour la résistance à la fatigue ϵ_6 , ici $\epsilon_6 = 126\mu m/m$, une augmentation du module E du matériau de couche de base compense la réduction de l'épaisseur de la couche de base et ainsi permet de réaliser des économies de matériaux (flèche horizontale bleue). Ainsi, une augmentation du module de 16 200MPa ($E/E_{EME} = 1,16$) à 21 400MPa ($E/E_{EME} = 1,53$) réduit l'épaisseur de la couche de base de 5% par rapport à l'épaisseur de référence ($e_{ref} = 207mm$), soit une diminution de 10mm dans le cas type étudié. Similairement, pour un module fixé, ici, $E(15^\circ C, 10Hz) = 14 000MPa$, il est aussi possible de faire varier la résistance à la fatigue ϵ_6 et alors de réduire l'épaisseur de couche de base nécessaire (flèche verticale noire) pour la même durée de vie fixée. Ainsi, une augmentation de résistance à la fatigue ϵ_6 de $130\mu m/m$ ($\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2} = 1,0$) à $140\mu m/m$ ($\epsilon_6/\epsilon_{6,EME2} = 1,077$), permet de réduire l'épaisseur de la couche de base de 5% par rapport à l'épaisseur de référence ($e_{ref} = 207mm$), soit une diminution de 10mm dans le cas type étudié.

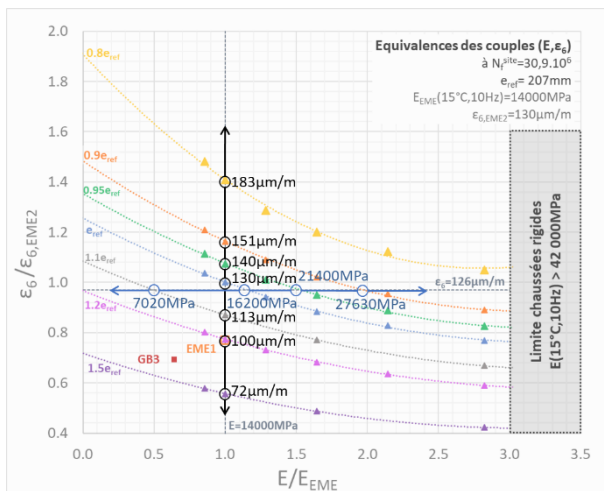


Figure 32 - Exemple d'analyse des courbes d'équivalence à durée de vie fixée

3.4.3 Superposition des duplications αN_f^{site} et βe_{ref}

Cette sous-section regroupe les réflexions des deux sous sections précédentes (3.4.1 et 3.4.2). La superposition de certaines courbes d'équivalence montre que pour un couple (E, ϵ_6) donné, et dans le cadre de ce cas type, deux solutions sont possibles en termes de durée de vie et d'épaisseur de couche de base : soit une épaisseur plus fine que celle de référence pour la durée de vie de référence N_f^{site} , soit une durée de vie plus élevée avec l'épaisseur de couche de base de référence.

La Figure 33 regroupe les Figure 29 et Figure 31 précédentes et met en évidence les superpositions de courbes de variation d'épaisseur et celles de changement de durée de vie. Les courbes de l'épaisseur e_{ref} et N_f^{site} se superposent identiquement car il s'agit de la même courbe d'équivalence de la situation de référence (présentée à la Figure 20). La superposition des courbes d'équivalence dupliquées pour des multiples de e_{ref} et de N_f^{site} permet en effet de trouver plusieurs configurations d'épaisseur de couche de base βe_{ref} et de durée de vie αN_f^{site} répondant à ce couple (E, ϵ_6) . Pour plus de précisions sur les valeurs n'apparaissant pas directement sur les courbes de la Figure 33, les valeurs des épaisseurs de couche de base des exemples d'analyse ci-dessous ont été calculées avec logiciel OPECC.

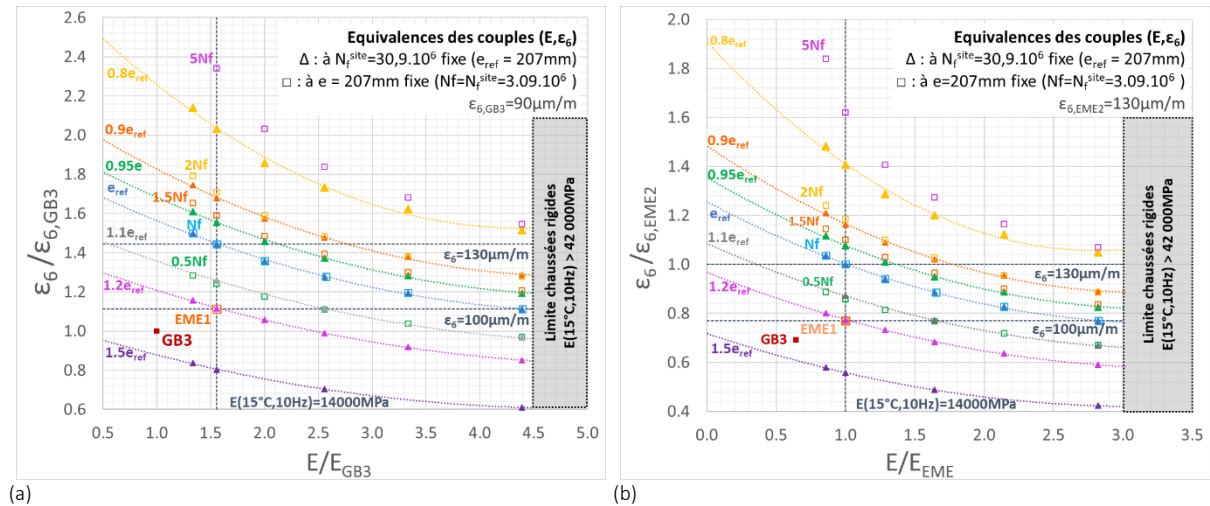


Figure 33 – Courbes d'équivalence de couples (E, ϵ_6) pour des propriétés équivalentes à celles de l'EME2 pour $N_f^{\text{site}} = 30,9.10^6$ ou $e = e_{\text{ref}} = 207\text{mm}$ fixée. Superposition des Figure 29 et Figure 31, (a) Référence $E_{GB3}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz}) = 9000\text{MPa}$, (b) Référence $E_{EME}(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz}) = 14000\text{MPa}$, Simulations $\theta = 15^\circ\text{C}$, $P = 20$ ans, $r = 50\%$, $E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$, $N_f^{\text{site}} = 30,9.10^6$, $\epsilon_{6,GB3} = 90\mu\text{m/m}$, $\epsilon_{6,EME2} = 130\mu\text{m/m}$, $a_2 = 5$, $a_3 = 2,5$, $e_{\text{ref}} = 207\text{mm}$, $0,8e_{\text{ref}} = 166\text{mm}$, $0,9e_{\text{ref}} = 197\text{mm}$, $0,95e_{\text{ref}} = 187\text{mm}$, $1,1e_{\text{ref}} = 228\text{mm}$, $1,2e_{\text{ref}} = 248\text{mm}$, $e_{\text{ref}} = 311\text{mm}$, $N_f^{\text{site}} = 30,9.10^6$, $0,5N_f^{\text{site}} \approx 15,5.10^6$, $1,5N_f^{\text{site}} \approx 46,4.10^6$, $2,0N_f^{\text{site}} \approx 61,8.10^6$, $5,0N_f^{\text{site}} \approx 154,5.10^6$

La Figure 34 met en lumière un exemple d'analyse qu'il est possible de réaliser avec la superposition des courbes d'équivalences obtenues à la Figure 33. En considérant le couple $(E = 14\ 000\text{MPa}, \epsilon_6 = 140\mu\text{m/m})$ à l'intersection des flèches horizontale bleue et verticale noire sur la Figure 34, deux nouvelles configurations des paramètres d'épaisseur de couche de base e_{ref} et de la durée de vie N_f^{site} sont possibles. En dimensionnant la chaussée pour la durée de vie N_f^{site} (courbe verte ou bleue), l'épaisseur de couche de base nécessaire n'est que de $0,95e_{\text{ref}}$. En augmentant l'épaisseur de la couche de base de 5%, la durée de vie de la structure de chaussée devient légèrement inférieure à $1,5N_f^{\text{site}}$.

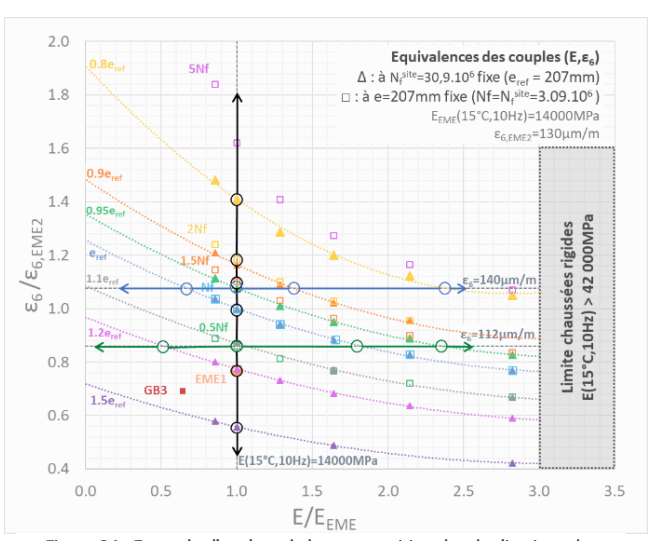


Figure 34 - Exemple d'analyse de la superposition des duplications des courbes d'équivalence

De même, en considérant le couple ($E=14\,000\text{MPa}$, $\epsilon_6=112\mu\text{m/m}$) à l'intersection des flèches horizontale verte et verticale noire sur la Figure 34, deux configurations des paramètres d'épaisseur de la couche de base e_{ref} et de la durée de vie N_f^{site} sont possibles. La 1^{ère} alternative est de conserver l'épaisseur de la couche de base : la durée de vie de la structure de chaussée n'est alors que de $0,5N_f^{\text{site}}$. La seconde alternative offre la possibilité d'augmenter l'épaisseur de couche de base de 10% (elle est alors de $1,1e_{\text{ref}}$) pour doubler la durée de vie et atteindre N_f^{site} . Deux autres simulations réalisées sur le logiciel OPECC montrent qu'en doublant la durée de vie de la structure de chaussée pour atteindre $2N_f^{\text{site}}$ puis $4N_f^{\text{site}}$, il suffit d'augmenter l'épaisseur de la couche de base de 10% à chaque fois pour atteindre respectivement $1,23e_{\text{ref}}$ (soit 255mm) pour $2N_f^{\text{site}}$ puis $1,35e_{\text{ref}}$ (soit 281mm) pour $4N_f^{\text{site}}$. Ainsi, dans cette situation, pour doubler la durée de vie, pour ce couple (E , ϵ_6) fixé, il faut à chaque fois augmenter l'épaisseur de couche de base de 10%.

3.5 Conclusion et perspectives

Les simulations précédentes ont mis en avant l'existence d'une courbe d'équivalence modélisant les couples (E , ϵ_6) présentant des performances équivalentes à celles de l'EME2 en termes de durée de vie. Cette courbe d'équivalence semble présenter une indépendance significative quant à l'épaisseur de dimensionnement de la chaussée ainsi qu'à la pente a_2 de la droite de fatigue. Il faut néanmoins prendre en compte que cette indépendance est possible pour le cas type étudié ici et ne peut pas encore être généralisée à toutes les structures de chaussée. Les duplications de la courbe d'équivalence selon des multiples de l'épaisseur de couche de base et de la durée de vie N_f^{site} font émerger le lien entre le dimensionnement et l'aspect coût-dimensionnement. Améliorer un ou plusieurs paramètres du couple (E , ϵ_6) ou ajuster la durée de vie au plus juste du besoin pourrait impliquer une diminution de l'épaisseur de la couche de base. Economiser seulement 5% ou quelques millimètres d'épaisseur de couche de base peut paraître insignifiant, mais au regard de la longueur totale d'une infrastructure routière, l'économie en volume de matériaux devient alors conséquente.

Partie 4 - Détermination de la température équivalente au Québec

L'établissement d'une température équivalente pour le dimensionnement permet de simplifier les calculs. En dimensionnement des chaussées, la température équivalente $T_{eq}(^{\circ}C)$ à un cycle annuel de température est la température à laquelle le dommage annuel cumulé est identique à celui d'un cycle thermique normal. Cependant, la notion de température équivalente n'est pas utilisée dans le dimensionnement des chaussées au Québec. La référence française ($T_{eq}=15^{\circ}C$) étant parfois utilisée, il est nécessaire de recalculer cette température afin de mieux représenter les conditions climatiques (variations de température, cycles de gel et dégel, gain et perte de capacité portante, dommages à la chaussée, etc.) propres au Québec et au Canada. Cette partie propose un calcul de la température équivalente inspiré de la méthode de calcul française décrite dans le Guide du SETRA LCPC de 1994 en s'appuyant sur les particularités routières et climatiques du Québec.

4.1 Modélisation des particularités du Canada

4.1.1 Diversité des cycles de température de l'air

L'étendue du Canada lui procure une grande diversité de climats et de profils de températures nécessitant l'adaptation des structures de chaussées dès leur dimensionnement. Plusieurs villes cibles sont retenues pour les particularités de leur profil de température annuel soit : l'est du Canada (Montréal), le centre du Canada (Régina) et l'ouest canadien (Vancouver) (Figure 36). La Figure 35 et le Tableau 5 retracent l'évolution des températures de l'air moyennes mensuelles sur l'année de ces trois villes⁴ dont les données sont issues de sondes de températures dans l'air situés à l'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau de Montréal, l'aéroport international de Régina et l'aéroport international de Vancouver. Ces lieux ont été choisi afin de limiter l'impact de l'altitude sur les relevés de températures. La ville de Paris a été ajoutée pour une comparaison avec les températures rencontrées en France.

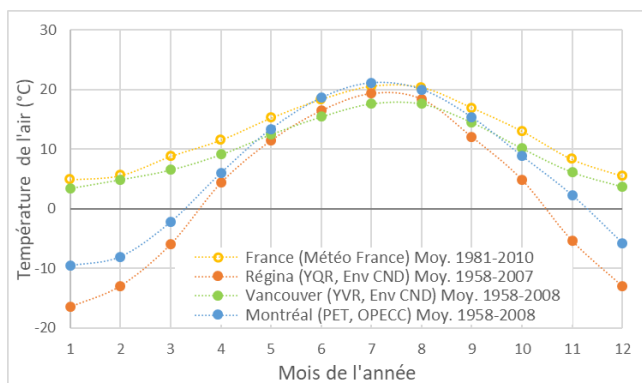


Figure 35 - Profils de température annuel de Montréal, Régina, Vancouver et Paris



Figure 36 - Carte du Canada (Google Maps, 2019)

Tableau 5 - Valeurs des températures de l'air moyennes mensuelles de Montréal, Régina, Vancouver et Paris

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Montréal	-9,62	-8,08	-2,25	5,98	13,39	18,63	21,14	20,01	15,35	8,83	2,26	-5,77
Régina	-16,50	-12,95	-5,96	4,34	11,46	16,48	19,35	18,41	12,06	4,86	-5,38	-13,01
Vancouver	3,43	4,89	6,52	9,09	12,49	15,45	17,65	17,61	14,52	10,15	6,14	3,70
Paris	4,90	5,60	8,80	11,50	15,20	18,30	20,50	20,30	16,90	13,00	8,30	5,50

⁴ Sources : Environnement Canada (Régina, Vancouver), OPECC (Montréal) et Météo France (Paris)

Dans un premier temps, les périodes de température sont équiréparties sur l'année. Ainsi, chaque période de température sera pondérée de 1/12 soit environ 8.3%. Pour rendre compte des restrictions de trafic en période de dégel, cette période peut être modifiée.

4.1.2 Structure étudiée

La structure de chaussée utilisée pour le calcul de la température équivalente est la Structure type B (Figure 37), soit une structure de type québécoise, reprenant les mêmes conditions de trafic que celles de l'EME2, soit un nombre d'ECAS égal à $27,1 \cdot 10^6$ (TMJA = 3060). L'épaisseur de la couche de base est déterminée par un calcul de dimensionnement sur OPECC en considérant le profil de température de la ville de Montréal (Tableau 5).

Surface	BBSG1	60mm	
Base	GB20	271mm	θ_i
Granulaire	MG20	250mm	ϵ_t
	MG56	450mm	
	MG112	975mm	
Sol		∞	

Figure 37 - Structure utilisée pour le calcul de la température équivalente

➤ Matériaux constitutifs

Les matériaux constitutifs de la structure de chaussée étudiée ici sont un ESG10 (équivalent du BBSG1 français) en couche de surface et une GB20 en couche de base dont les propriétés et les paramètres 2S2P1D sont rappelés dans le Tableau 6.

Tableau 6 - Paramètres 2S2P1D des matériaux ESG10 et GB20 utilisés

Matériaux		ESG10 ¹	GB20 ²
Paramètres Huet-Sayegh	E_0 (MPa)	37000	39500
	E_{00} (MPa)	400	25
	ν	0.350	0.350
	δ	2.667	1.750
	k	0.182	0.177
	h	0.517	0.550
	T_{REF} (°C)	10	10
	τ_0 (s)	0.0500	0.0082
	β	2000	500
	C_1	29.24	16.74
C_2	201.21	126.62	
Fatigue	$N_{f1}(\theta_{test}, f_{test})$	1E-14	4.78E-13
	$\epsilon_6(\theta_{test}, f_{test})$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	100	87
	$(\theta_{test}, f_{test})$	(10°C, 10Hz)	(10°C, 10Hz)
	a_2	5	4.5
	a_3	2.5	2.5
¹ Doctorat Meunier, Compilation Enrobés LCMB 20-08-2008			
² Fiche Technique de Produit - Rue des érables			

➤ Modules $|E^*|$ à la température considérée

Pour chacune des périodes de température, il faut déterminer le module complexe de l'enrobé considéré en couche de base. Pour cela, nous effectuerons les calculs grâce à la courbe maîtresse du matériau choisi. En entrant les paramètres de calculs du modèle 2S2P1D (E_0 , E_{00} , δ , k , h , β , τ_0 , T_0 , C_1 , C_2) et la température de référence T_{REF} (°C) de la courbe maîtresse, il est possible de connaître le module à la fréquence et à la température souhaitées. Ces modules sont aussi calculés dans OPECC grâce à ces mêmes paramètres des matériaux.

4.1.3 Modification de la capacité portante due au cycle de gel-dégel

Les sollicitations climatiques sur les structures de chaussées sont différentes selon les trois périodes principales qui sont identifiables sur une année :

- L'hiver, période de gel de la chaussée, généralement entre novembre et février,
- Le printemps, période de dégel de la chaussée, généralement entre mars et mai,
- L'été et l'automne, période estivale, généralement entre juin et octobre.

Pour prendre en compte la variation de la capacité portante de la chaussée due au gel et au dégel dans cet exemple de calcul, les variations de module des couches granulaires ont été choisies :

- ✓ L'hiver générant le gel de la chaussée : hausse de 30%,
- ✓ Le printemps produisant le dégel de la chaussée : chute de 30%,
- ✓ L'été et l'automne : aucune variation.

Pendant l'hiver, le gel de la chaussée augmente sa capacité portante. En revanche, en période de dégel, la route est de 30 à 70% plus fragile qu'en temps normal (Doré & Zubeck, 2008). La limite de ce calcul est qu'il ne considère pas la variabilité de la profondeur de gel (dépendant des épaisseurs des matériaux) ni du fait que le gel, comme le dégel est progressif (variable au cours d'un mois donné).

4.1.4 Restrictions de trafic : zones de dégel et réduction de charges

Le Québec compte trois zones de dégel. La période des restrictions de charge sont définies chaque printemps par le ministère des Transports et peuvent être décalées dans le temps (§1.1.1). Une faible diminution des charges réduit considérablement les dommages causés à la chaussée. Au cours de cette période de dégel, des restrictions de charges sont alors imposées aux véhicules lourds en période de dégel. Ces restrictions varient de 8 % à 20 % pour l'ensemble du trafic considéré pendant les mois de dégel, soit généralement entre mars et mai (Transport Quebec, 2019).

4.2 Calcul de dommage et loi de Miner

En France, la température équivalente T_{eq} pour le dimensionnement de chaussée est de 15°C. Son calcul est basé sur un calcul de dommage équivalent suivant la loi de Miner et la méthode de calcul décrite dans le Guide du SETRA LCPC de 1994.

4.2.1 Dommage cumulé

En dimensionnement des chaussées, la température équivalente T_{eq} (°C) à un cycle annuel de température est la température à laquelle le dommage annuel cumulé est identique à celui d'un cycle thermique normal. Le dommage élémentaire dépend du type de chargement et du type de structure et épaisseur de chaussée. Le dommage cumulé équivalent D correspond à la somme pondérée des dommages élémentaires d_i sur une année. Lorsqu'il atteint la valeur de 100%, la ruine totale de la chaussée est atteinte. D'après la loi de Miner, le dommage annuel est défini par l'équation [6] :

$$D = \frac{1}{N_{eq}} = \sum_i d_i(\theta_i) \cdot \%_{période\ i} \quad [6]$$

Où, $d_i(\theta_i)$: Dommage élémentaire sur la période de température θ_i
 $\%_{période\ i}$: Répartition des périodes de température sur l'année

4.2.2 Dommage élémentaire

Le dommage élémentaire d_i est calculé pour chaque période de température θ_i d'après la relation suivante (équation [7]):

$$d_i(\theta_i) = \left(\frac{\varepsilon_6(\theta_i)}{\varepsilon_t(\theta_i)} \right)^{1/b} = \left(\frac{\varepsilon_6(\theta_i)}{\varepsilon_t(\theta_i)} \right)^{-a_2} \quad [7]$$

Où, $\varepsilon_6(\theta_i)$: Résistance à la fatigue du matériau pour la période de température θ_i ($\mu\text{m/m}$)
 $\varepsilon_t(\theta_i)$: Déformation horizontale du matériau pour la période de température θ_i ($\mu\text{m/m}$)
 a_2 : Pente de la droite de fatigue (pour SETRA-LCPC : $-1/b$)

4.2.3 Variations de la résistance à la fatigue $\varepsilon_6(\theta_i)$

Dans la méthode de dimensionnement utilisée dans le logiciel OPECC, le facteur de translation entre les droites de Wöhler dans les espaces $\log(N_f)=f(\log(\varepsilon_0))$ et $\log(N_f)=f(\log(E_0))$ (Figure 8) permet d'établir les relations suivantes (Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019) :

$$N_{f1}(\theta_i) = N_{f1}(\theta_{\text{test}}) \cdot \left(\frac{E(\theta_{\text{test}})}{E(\theta_i)} \right)^{a_3} \quad [8]$$

En combinant la relation entre ε_6 et $N_{f1}(\theta_{\text{test}})$ (équation [3]) et l'équation [8], il est possible d'établir l'équation [9] déterminant les variations de la résistance à la fatigue $\varepsilon_6(\theta_i)$:

$$\varepsilon_6(\theta_i) = \varepsilon_6(\theta_{\text{test}}) \cdot \left(\frac{E(\theta_{\text{test}})}{E(\theta_i)} \right)^{\frac{a_3}{a_2}} \quad [9]$$

Note : Pour se rapporter à la méthode française (SETRA-LCPC), les valeurs préconisées des coefficient a_2 et a_3 sont $a_2=5,0$ et $a_3=2,5$ (Perraton, Di Benedetto, Carter, & Proteau, 2019). Alors le rapport a_3/a_2 vaut 0,5, ce qui concorde bien avec la méthode de conception des chaussées souples en France qui, pour les structures en climat tempéré et à des températures positives, retient que l'influence de la température sur le comportement en fatigue est représentée par la relation [10] :

$$\varepsilon_6(\theta_i) \cdot \sqrt{E(\theta_i)} = \text{constante} \quad [10]$$

Il est alors possible d'écrire la relation [11] :

$$\varepsilon_6(\theta_i) \cdot \sqrt{E(\theta_i)} = \varepsilon_6(\theta_{\text{test}}) \cdot \sqrt{E(\theta_{\text{test}})} \quad [11]$$

Donc, il est possible de déterminer la valeur de ε_6 pour chaque période de température θ_i suivant la relation [12], équivalente à l'équation [9] en utilisant les valeurs $a_2=5,0$ et $a_3=2,5$:

$$\varepsilon_6(\theta_i) = \varepsilon_6(\theta_{\text{test}}) \cdot \sqrt{\frac{E(\theta_{\text{test}})}{E(\theta_i)}} \quad [12]$$

4.2.4 Variations de la déformation horizontale $\epsilon_t(\theta_i)$

Les déformations horizontales principales ϵ_t à la base du revêtement, c'est-à-dire au bas de la couche de base (Figure 37), sont utilisées dans l'expression du dommage élémentaire. Elles sont calculées via le logiciel OPECC pour chaque période de température selon les paramètres du cas étudié (nombre d'ÉCAS constant, profil de température souhaité et les paramètres des matériaux considérés dans la structure de chaussée). Les variations saisonnières de modules induites par le gel-dégel introduites précédemment impactent les valeurs des déformations ϵ_t .

4.3 Calcul de la température équivalente à Montréal

4.3.1 Cycles de température à mi-couche de base (spécifique à la structure étudiée)

Les cycles de température considérés dans le calcul de la température équivalente sont celles mesurées au milieu de la couche de base, soit à 195,5mm de profondeur en utilisant la Structure type B (Figure 37). La Figure 38 et le Tableau 7 montrent l'évolution de la température mesurée à mi-couche de base pour le profil de température de la ville de Montréal. Afin de simplifier les calculs, on fait l'hypothèse que la température est uniforme sur toute l'épaisseur de la couche de base.

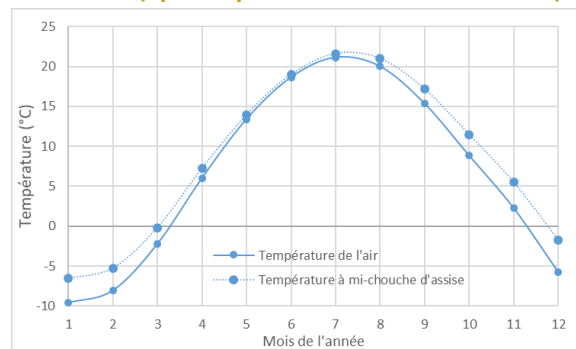


Figure 38 - Cycles de température mesurée à mi-couche de base (Moyenne 1958-2008, OPECC)

Tableau 7 - Températures à mi-couche de base pour le profil de température de Montréal et périodes de températures (Moyennes mensuelles sur les années 1958-2008 tirées d'OPECC)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Montréal	-6.55	-5.25	-0.21	7.21	13.95	18.99	21.60	21.00	17.17	11.48	5.52	-1.73
%période	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083

4.3.2 Calcul classique (sans variation de module ni restriction de trafic)

Les valeurs des températures à mi-couche de base liée, les valeurs des modules $|E^*|$ et des déformations ϵ_t sont calculées via le logiciel OPECC et synthétisées dans le Tableau 8. Les valeurs de la résistance à la fatigue $\epsilon_6(\theta_i)$ sont calculées avec l'équation [9]. Les valeurs des dommages élémentaires d_i sont déterminées suivant l'équation [7]. Le dommage équivalent sur l'année est de 0,078 (Tableau 8).

Tableau 8 - Résultats du calcul classique de la température équivalente

Calcul classique	Mois	T (°C) à mi-couche d'assise	Durée de la période (%)	$ E^* $ (MPa)	$\epsilon_6(\theta_i)$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\epsilon_t(\theta_i)$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Dommage élémentaire $[d(\theta_i)] (10^6)$	1/N(θ_{eq})	Dommage élémentaire cumulé
	Janvier	-6.55	8.3	22796	52	23.77	0.029		0.078
Février	-5.25	8.3	21770	54	24.67	0.031	0.060		
Mars	-0.21	8.3	17684	60	29.12	0.038	0.098		
Avril	7.21	8.3	11630	76	40.08	0.057	0.155		
Mai	13.95	8.3	6829	102	59.82	0.091	0.245		
Juin	18.99	8.3	4195	134	84.76	0.129	0.374		
Juillet	21.60	8.3	3192	156	102.30	0.152	0.525		
Août	21.00	8.3	3402	150	97.63	0.144	0.669		
Septembre	17.17	8.3	5038	121	73.86	0.109	0.779		
Octobre	11.48	8.3	8447	91	50.66	0.073	0.852		
Novembre	5.52	8.3	12980	71	36.71	0.050	0.902		
Décembre	-1.73	8.3	18930	58	27.42	0.035	0.937		

Pour trouver la température équivalente, il faut tracer le dommage élémentaire en fonction de la température. Chaque point représente une période de température soit un mois de l'année. La température équivalente est la température à laquelle l'intersection entre cette courbe et la valeur du dommage élémentaire équivalent (Figure 39). Pour le calcul classique, pour les températures moyennes de la ville de Montréal, Figure 39 la température équivalente est **12.1°C** (Figure 39). La Figure 40 retrace l'évolution du dommage élémentaire cumulé sur l'année.

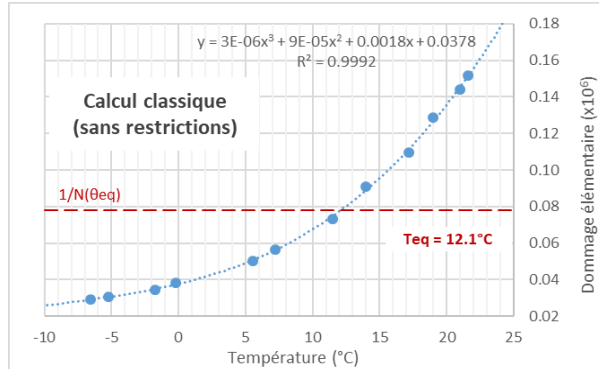


Figure 39 - Evolution du dommage élémentaire en fonction de la température (°C)

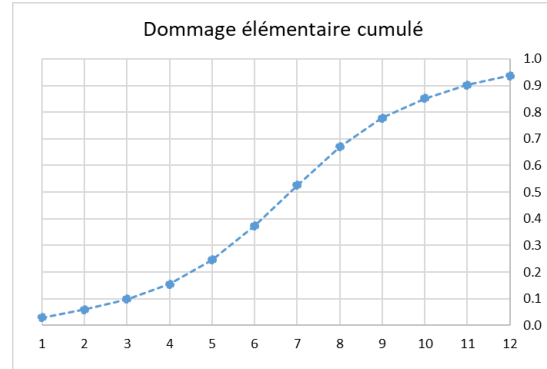


Figure 40 - Evolution du dommage cumulé sur une année

4.3.3 Calcul avec perte de capacité portante au cours du gel et du dégel

Pour cet exemple, les variations saisonnières de modules appliquées sont décrites dans la section 4.1.3. Ainsi, les valeurs des températures à mi-couche de base, les valeurs des modules $|E^*|$ et des déformations ϵ_t sont recalculées via le logiciel OPECC et renseignées dans le Tableau 9. Les valeurs de la résistance à la fatigue $\epsilon_6(\theta_i)$ ont été calculées avec l'équation [9]. Les valeurs des dommages élémentaires ont été déterminés suivant l'équation [7].

Tableau 9 - Résultats du calcul avec perte ou gain de capacité portante due au gel/dégel

Calcul avec perte de capacité portante due au gel/dégel	Mois		T (°C) à mi-couche d'assise	Durée de la période (%)	$ E^* $ (MPa)	$\epsilon_6(\theta_i)$ ($\mu\text{m/m}$)	$\epsilon_t(\theta_i)$ ($\mu\text{m/m}$)	Dommage élémentaire [d(θ_i)] (10^6)	1/N(θ_{eq})	Dommage élémentaire cumulé
	Janvier	hiver/gel	0.023	8.3	22796	52	22.57	0.023	0.083	0.023
Février	hiver/gel	0.047	8.3	21770	54	23.41	0.024	0.047		
Mars	dégel	0.100	8.3	17684	60	31.22	0.052	0.100		
Avril	dégel	0.179	8.3	11630	76	43.21	0.079	0.179		
Mai	dégel	0.311	8.3	6829	102	65.03	0.132	0.311		
Juin	été/aut.	0.440	8.3	4195	134	84.76	0.129	0.440		
Juillet	été/aut.	0.591	8.3	3192	156	102.30	0.152	0.591		
Août	été/aut.	0.735	8.3	3402	150	97.63	0.144	0.735		
Septembre	été/aut.	0.845	8.3	5038	121	73.86	0.109	0.845		
Octobre	été/aut.	0.918	8.3	8447	91	50.66	0.073	0.918		
Novembre	été/aut.	0.968	8.3	12980	71	36.71	0.050	0.968		
Décembre	hiver/gel	0.995	8.3	18930	58	25.99	0.027	0.995		

Le dommage équivalent sur l'année est alors de **0.0829** (Tableau 8). Dans cette situation, d'après la Figure 41, la température équivalente est alors **9.8°C**. La prise en compte de la modification de la capacité portante de la chaussée sous l'action du gel-dégel provoque un écart de 2,3°C pour la température équivalente. Sur la Figure 42, le décrochage des deux courbes des dommages élémentaires cumulés en hiver au début du printemps (donc du dégel) montre l'impact de la prise en compte du gel et du dégel de la structure de chaussée sur l'évolution du dommage élémentaire cumulé.

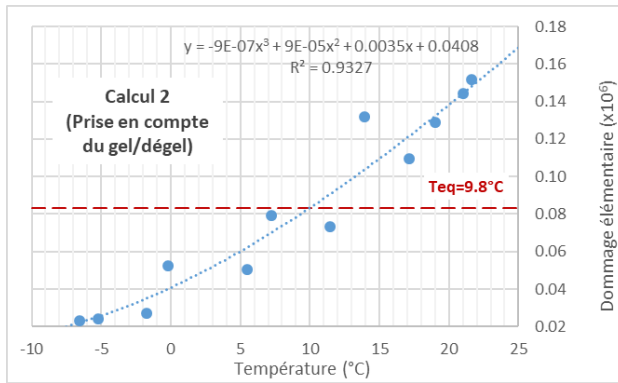


Figure 41 – Evolution du dommage élémentaire en fonction de la température (°C) avec impact du gel et du dégel

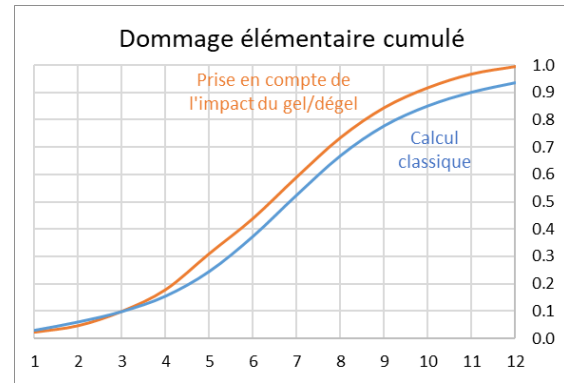


Figure 42 – Evolution du dommage cumulé au cours de l'année avec et sans impact du gel et du dégel

4.3.4 Impact de la prise en compte de la chute du module au dégel calculée avec OPECC

Lors du choix de la valeur des variations des modules des couches granulaires pendant le gel et le dégel, le logiciel OPECC applique cependant aussi cette variation de module au module du sol support. Or, dans le cas des structures aux épaisseurs importantes, le front de gel n'atteint pas forcément le sol et cette modification de module n'a donc pas lieu d'être. Un second calcul similaire au calcul précédent a été effectué en modifiant manuellement uniquement les modules des couches granulaires dans les propriétés des matériaux de la structure (données en orange sur la Figure 43). Le Tableau 10 compare les résultats obtenus par les deux méthodes de prise en compte de la chute de module au dégel avec le calcul classique (sans perte de module) uniquement pour les trois mois de dégel sachant qu'elle est nettement visible dans la variation de la déformation horizontale ϵ_t .

Tableau 10 - Comparaison de la prise en compte de la chute de module au dégel

	Mois	$\epsilon_t(\theta)$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Dommage élém. [d(θ)]	1/N(θ_{eq})	Teq (°C)
Calcul OPECC sans pertes	Mars	29.12	0.038	0.0781	12.10
	Avril	40.08	0.057		
	Mai	59.82	0.091		
Calcul OPECC avec pertes de 30%	Mars	31.22	0.052	0.0829	9.80
	Avril	43.21	0.079		
	Mai	65.03	0.132		
Calcul OPECC avec pertes de 30% des couches granulaires	Mars	30.80	0.049	0.0819	10.16
	Avril	42.73	0.076		
	Mai	64.87	0.131		

La Figure 43 compare la valeur de la température équivalente déterminée avec ces deux approches de calcul. Un écart de 0,36°C est obtenu entre ces deux calculs. En conclusion, dans l'exemple présenté, cet écart n'est pas significatif du fait de l'incertitude sur les courbes modélisant l'évolution du dommage élémentaires et des simplifications effectuées sur l'évolution du gel et du dégel (expliquées dans la partie 4.1.3).

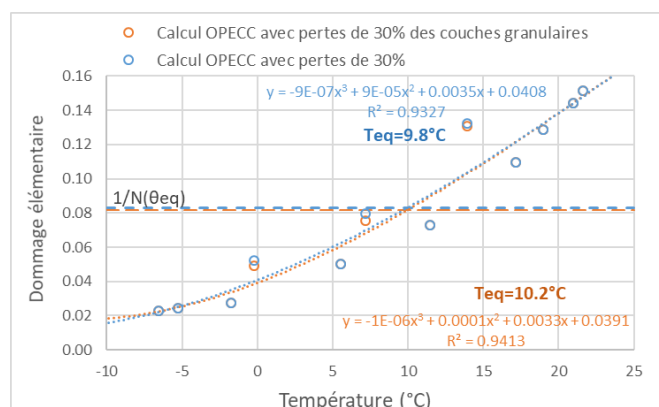


Figure 43 – Comparaison de la méthode de la prise en compte de la variation du module des couches granulaires au dégel
Page 42 | 41

Pour mieux rendre compte de l'importance des dommages pendant les mois de dégel, le facteur de dommage relatif permet de quantifier la part de chaque dommage élémentaire mensuel sur le dommage équivalent annuel (Direction du laboratoire des chaussées, 1998). Il est défini par le quotient [13] suivant :

$$\frac{(d_i(\theta_i) \cdot \%_{période_i})}{1/N_{eq}} \quad [13]$$

La Figure 44 représente, pour chacun des trois calculs sur OPECC (calcul classique sans perte, calcul avec perte de 30% du module pour les matériaux sous le revêtement et calcul avec perte de 30% des modules uniquement des couches granulaires). Si le facteur de dommage relatif des deux calculs prenant en compte la perte de module au dégel reste semblable, cette figure montre bien que l'endommagement causé par le dégel est bien plus important. Pour le calcul d'une température équivalente en région froide, cet aspect n'est donc pas à négliger.

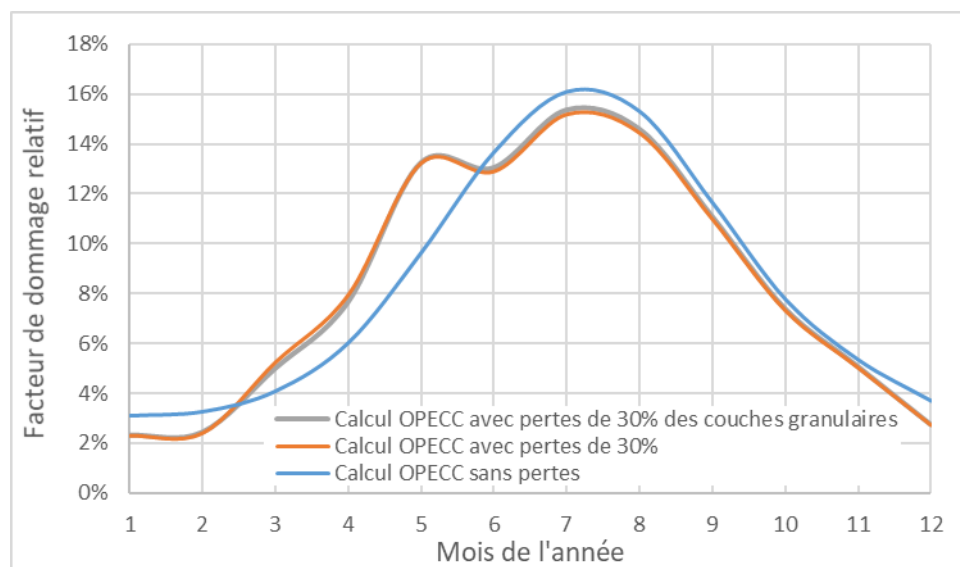


Figure 44 - Evolution du facteur de dommage relatif pour les 3 calculs

4.3.5 Calcul avec prise en compte des restrictions de charges

Enfin, des modifications de trafic sont ajoutées pour rendre compte de l'effet des restrictions de charges dans les zones de dégel définies par le ministère des transports. Pour cet exemple, une restriction de 15% des charges totales est appliquée sur les mois de mars et avril, puis 10% sur le mois de mai. Ces restrictions modifient la période de température $\%_{période_i}$, soit la pondération du dommage de chaque mois dans le calcul du dommage équivalent. La période attribuée aux mois sans restriction de trafic sera recalculée pour atteindre 100%. Le dommage équivalent sur l'année est alors de **0,0829**, soit quasiment égal à celui sans restriction de trafic sur la période considérée tout comme la température équivalente trouvée.

4.4 Conclusion et perspectives

Le Tableau 11 rassemble les principaux résultats obtenus pour le calcul de la température équivalente à Montréal. La température obtenue par le calcul classique est de 12,1°C à Montréal dans les conditions considérées. La prise en compte de la chute de la capacité portante au dégel abaisse la température équivalente de plus de 2°C.

Tableau 11 - Conclusions des calculs de température équivalente

	Température équivalente	Damage équivalent
Calcul classique	12,1°C	0,0781
Calcul avec pertes de 30% du module des matériaux sous le revêtement	9,8°C	0,0829
Calcul avec pertes de 30% de module des couches granulaires	10,2°C	0,0819
Calcul avec pertes de 30% et restrictions de trafic	9,8°C	0,0829

A la vue de ces résultats, il serait intéressant d'intégrer la notion de température équivalente pour prendre en compte les particularités climatiques locales dans le dimensionnement des structures de chaussées.

Conclusion générale

Le choix d'employer un EME est motivé d'un point de vue économique et performantiel, car l'utilisation de matériaux plus performants permet d'espacer les travaux d'entretien dans la vie de la chaussée. Il est également motivé d'un point de vue écologique afin de réduire les épaisseurs et les volumes de matériaux nécessaires à la construction de l'infrastructure routière tout en offrant à l'utilisateur un service en toute sécurité.

L'objectif de ce mémoire était de définir la notion d'EME du point de vue du dimensionnement de structures de chaussées bitumineuses souples. Les simulations numériques effectuées sur le logiciel OPECC ont permis de définir un coefficient de bonification ou ratio de durée de vie quantifiant la performance des enrobés suivant la méthode mécanistique-empirique. L'exercice a été renouvelé à plusieurs températures de dimensionnement pour comparer les performances en termes de durée de vie des enrobés à haut module (ou à haute performance) dont les exigences minimales étaient définies par la valeur de module E à différentes températures de dimensionnement.

D'autres simulations numériques ont mis en évidence une courbe d'équivalence des couples module/résistance à la fatigue (E, ϵ_6) équivalents à celui de l'EME2 français en termes de performance et de durée de vie. Cette courbe d'équivalence semble montrer une certaine indépendance vis-à-vis de la durée de vie imposée et de la valeur de la pente de la droite de fatigue dans le cadre du cas type étudié. Les liens entre le dimensionnement et la performance ont été mis en lumière par la duplication de cette courbe d'équivalence suivant différentes épaisseurs de la couche de base et différentes durées de vie. Plusieurs configurations d'épaisseurs de la couche de base liée et de durée de vie de la chaussée sont alors possibles selon les variations d'un ou des deux paramètres (E, ϵ_6).

Enfin, tout au long de ce mémoire, il a été montré que la température est un facteur déterminant pour quantifier les performances des enrobés, tout comme l'EME2. Si en France, la température équivalente utilisée pour le dimensionnement des chaussées est de 15,0°C, la température équivalente obtenue à Montréal par le calcul classique est de 12,1°C et de 10,2°C en prenant en compte la modification de la capacité portante pendant les mois de gel et de dégel de la structure de chaussée. La température de dimensionnement est un élément indissociable du dimensionnement des structures de chaussée québécoises compte tenu de l'impact des sollicitations climatiques sur les chaussées tout au long de l'année. A la vue de ces résultats, il serait intéressant d'intégrer la notion de température équivalente dans le dimensionnement des structures de chaussées au Québec.

Bibliographie

- Agence Française de Normalisation (AFNOR). (2011). *Norme NF P 98-086*.
- Brosseaud, Y. (2015). Les enrobés à module élevé : Bilan de l'expérience française et transfert de technologie.
- Brosseaud, Y., & Saint-Jacques, M. (2015, Octobre). Les enrobés à module élevé : bilan de près de 30 ans d'expérience française. *Via Bitume*, 10(3), pp. 11-17.
- CIA World Book. (2019). Consulté le Juillet 2019, sur <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>
- C-SHRP (Programme stratégique de recherche routière du Canada). (2000, Septembre). Restrictions saisonnières de charge imposées au Canada et dans le monde. *Bulletin technique n°F21*.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 1 : Description et propriétés des constituants*. Levoisier.
- Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés des mélanges*. Levoisier.
- Di Benedetto, H., & Olard, F. (2003). "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes. *Road Materials and Pavements Design*.
- Direction du laboratoire des chaussées. (1998, Septembre). Variations saisonnières de l'endommagement structural. *Bulletin d'information technique Vol.3 n°9*.
- Doré, G., & Zubeck, H. (2008). *Cold Regions Pavement Engineering*. McGraw-Hill Education.
- Fortin, G. (2010). Variabilité et fréquence des cycles de gel-dégel dans la région de Québec, 1977-2006. *Le Géographe canadien* 54, pp. 198-208.
- Konrad, L., & Roy, M. (1997). Pavement performance in cold regions indubitably associated with geotechnical engineering principles. *Dept. of Civil Engineering University Laval, Quebec, Canada*.
- Lachance, D. (1999). *Analyse mécanique des chaussées flexibles dans un contexte mécanique nordique*. Université Laval, Québec, Canada.
- Meunier, M., & Perraton, D. (2010). *OPRM (Outils de Prédiction Routier en Matériaux) : guide de l'utilisateur*. Ecole de Technologie Supérieure.
- Perraton, D., Carter, A., Proteau, M., Lamothe, S., & Pouteau, B. (2018). High Modulus Asphalt Mixes (EME) for Cold Climate : HPAC, Ongoing Cooperative Reseach Project.
- Perraton, D., Di Benedetto, H., Carter, A., & Proteau, M. (2019, Avril 27). Link between different bottom-up fatigue's law coefficients of mechanical-empirical parvemetment design software. *Construction and Building Materials*.
- SETRA LCPC. (1994). *Guide technique : conception et dimmensionnement des structures de chaussées*.
- St Laurent, D., & Roy, M. (1995). Evaluation structurale de chausséessouples dans un coutexte climatique nordique. *Rapport GCS-95-05*.
- Transport Quebec. (2019). *Site du Ministère des Transports du Québec*. Consulté le mai 2019, sur <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/degel/Pages/periode-restrictions.aspx>

Annexes

Annexe 1 : Matériaux

Tableau 12 – Annexe 1 : Paramètres et données des matériaux

Couche	Type	Epaisseur (mm)	E (0°C,10Hz) ¹ (MPa)	E (5°C,10Hz) ² (MPa)	E _{0test} (10°C,10Hz) ¹ (MPa)	E (15°C,10Hz) ¹ (MPa)	E (30°C,10Hz) ¹ (MPa)	ε _{0,0test} (10°C,25Hz) ¹ (µm/m)	N _{f1} (θ _{test} ,f _{test}) ²	v ¹	SN _f ¹ (m)	k _c ¹	k _s ³	-1/b (a ₂) ¹	a ₃	β _{a1}
Surface	BBSG1	60	12 000	9 856	7 315	5 500	1 300	100	1.0000E-14	0.35	0.25	1.1	0.91	5.0	2.5	1.00
Base	GB3	Variable	18 300	15 090	11 880	9 000	2 700	90	5.9049E-15	0.35	0.30	1.3	0.91	5.0	2.5	2.30
	EME1-A		24 000	20 470	16 940	14 000	6 000	100	1.0000E-14	0.35	0.30	1.0	0.91	5.0	2.5	0.62
	EME1-B			13 177	10 890	9 000		100	1.0000E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62
	EME1-C			16 396	13 550	11 200		100	1.0000E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62
	EME2-A		24 000	20 470	16 940	14 000	6 000	130	3.7129E-14	0.35	0.25	1.0	0.91	5.0	2.5	0.62
	EME2-B			13 177	10 890	9 000		130	3.7129E-14	0.35	0.25	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62
	EME2-C			16 396	13 550	11 200		130	3.7129E-14	0.35	0.25	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62
	EME*-A		20 470	16 940	14 000		115	2.0114E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
	EME*-B		13 177	10 890	9 000		115	2.0114E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
	EME*-C		16 396	13 550	11 200		115	2.0114E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
	EME**-A		20 470	16 940	14 000		145	6.4097E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
	EME**-B		13 177	10 890	9 000		145	6.4097E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
	EME**-C		16 396	13 550	11 200		145	6.4097E-14	0.35	0.30	1.0	0.909	5.0	2.5	0.62	
Sol		∞	-	-	-	50	-	-	-	0.35	-	-	-	-	-	-

¹ Pour BBSG1, EME1, EME2 et GB3 : seulement Base de données Alizé (Norme NF P98-086 annexe F normative)

² N_{f1}(θ_{test}, f_{test}) = 10⁶ · (ε_{0,m/m})^{0.2}

³ k_s = $\frac{1}{1,1}$ pour 50MPa ≤ E_{sol} < 120MPa

Annexe 2 : Résultats obtenus dans la section 2.1

Tableau 13 – Annexe 2 : résultats et ratio obtenus à 0°C, 15°C et 30°C (section 2.1)

Température (°C)	Enrobé en couche de base	ECAS fixé (4,84.10 ⁶)				e = e _{ref} GB3					
		E(θ°C) / E _{GB3} (θ°C)	e ¹ (mm)	e/e _{ref} ²	ε _i ⁵ (µm/m)	e ¹ (mm)	ECAS (en millions)	ECAS / ECAS ^{GB3} ³	ε _i ⁵ (µm/m)	N _f ^{site} (en millions)	N _f ^{site} / N _f ^{site-GB3} ⁴
0°C	GB3	1.0	170	1.00	62.0	170	4.84	1.00	62.0	5.06	1.00
	EME1	1.3	161	0.95	55.2		6.74	1.39	51.7	7.01	1.39
	EME2	1.3	127	0.75	71.6		22.70	4.69	51.7	26.01	5.15
15°C	GB3	1.0	207	1.00	88.5	207	4.84	1.00	88.5	5.03	1.00
	EME1	1.6	191	0.92	72.4		8.00	1.65	65.5	8.32	1.66
	EME2	1.6	154	0.74	93.5		27.14	5.61	65.5	30.90	6.15
30°C	GB3	1.0	277	1.00	161.2	277	4.84	1.00	161.2	5.08	1.00
	EME1	2.2	243	0.88	110.8		12.15	2.51	92.4	12.33	2.43
	EME2	2.2	200	0.72	142.9		43.48	8.98	92.4	45.77	9.02

¹ Epaisseur de la couche de base (mm)

² e_{ref} est l'épaisseur de la couche de base de GB3 à la température de dimensionnement considérée (mm)

³ ECAS^{GB3} est le nombre d'ECAS supporté par la structure en GB3 à la température de dimensionnement θ identique

⁴ N_f^{site-GB3} est la durée de vie maximale admissible de la chaussée constituée de GB3 à la température de dimensionnement θ identique

⁵ ε_i est la déformation principale horizontale sous les couches de matériaux bitumineux (soit de la couche de base) (µm/m)