

DURABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES SOUS L'EFFET DU TRAFIC ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES – COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX BITUMINEUX VIS-À-VIS DES CYCLES DE GEL ET DE DÉGEL TOME III DE III

Rapport final – Projet R825.1 - présenté au
Ministère des Transports du Québec

Par

Olivier Chupin, ing., Ph.D.
Jean-Michel Piau, ing. Recherche
Jean-Pascal Bilodeau, ing., Ph.D.
Benjamin Shiferaw, ing., Ph.D.
Guy Doré, ing., Ph.D.
Ferhat Hammoum, ing., Ph.D.
Stéphane Bouron, TS
Sylvain Auger, TS

Novembre 2021
Université Laval, Québec

**DURABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES
STRUCTURES DE CHAUSSÉES SOUS L'EFFET
DU TRAFIC ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES –
COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX BITUMINEUX
VIS-À-VIS DES CYCLES DE GEL ET DE DÉGEL
TOME III DE III**

Résumé

Ce projet de collaboration entre l'Université Laval, le Ministère des Transports du Québec, l'Université Gustave Eiffel et la DGITM (France) visait à investiguer à échelle réelle la durabilité des couches de surface bitumineuses des chaussées routières sous l'effet combiné du trafic et des conditions climatiques. Elle s'inscrit également dans le cadre de travaux effectués en France sur l'apparition subite de nids de poule observées à l'occasion de périodes hivernales combinées à de l'emmagasinement d'eau dans les enrobés. Des essais réalisés à l'échelle du laboratoire ont préalablement montré que ces désordres pouvaient s'initier par des déformations de gonflement se produisant dans les enrobés partiellement saturés en eau dues au changement de phase. L'étude réalisée dans le cadre de ce projet s'appuie sur un essai en grandeur réelle à l'Université Laval et a cherché à confirmer la réalité in situ de ces effets.

L'étude comportait un volet expérimental et un volet modélisation pour l'interprétation des mesures expérimentales. Une chaussée instrumentée comportant deux couches d'enrobé (ESG10 sur GB20) a été construite dans la fosse de laboratoire de l'Université Laval. Après une phase préliminaire d'essais en condition sèche, le bicouche a été partiellement saturé. Des cycles thermiques de 5°C et -10°C ont été appliqués en conditions sèche et saturée, avec ou sans les charges de trafic du simulateur routier. De nombreux résultats expérimentaux, essentiellement des mesures de température, de teneur en eau, de déflexion et des mesures de déformation dans les enrobés, ont été collectés. Des campagnes d'auscultation complémentaires (FWD, carottages pour mesure de teneur en eau dans les enrobés, essais AMAC) ont également été réalisées. Le volet modélisation a été effectué sur la base de calculs aux éléments finis (EF) 3D pour l'analyse de la réponse de la structure sous chargements thermiques et du logiciel ViscoRoute© 2.0 pour la réponse sous charges roulantes. Les calculs EF ont été réalisés en repartant d'un script qui couple la résolution de l'équation de la chaleur et du problème mécanique intégrant une loi de comportement thermoélastique avec déformation de gonflement due au gel. Des prolongements de ce script ont été effectués afin de tenir compte de façon approchée de conditions de frottement aux interfaces entre les couches d'enrobés et l'enrobé de base et la surface des matériaux granulaires.

Les manipulations ont permis d'atteindre de forts niveaux de saturation en eau dans les enrobés suite aux phases de mouillage de la structure par écoulement gravitaire assisté par la circulation

du simulateur. Il a également été constaté que la couche d'accrochage entre les deux couches d'enrobé n'a pas complètement imperméabilisé la structure sous la couche de surface; des conditions de saturation partielle ont été notées dans la couche de base. Les cycles thermiques, relativement longs, imposés à la structure se traduisent par le gel des couches granulaires partiellement saturées conduisant à une rigidification significative de l'ensemble de la structure. Néanmoins, la présence de déformation de gonflement par le gel des couches d'enrobé partiellement saturées est manifeste sur les mesures de jauges situées dans l'ESG10 et fort probable dans la GB20. L'interprétation de l'essai par simulation numérique permet d'estimer l'amplitude de gonflement au gel à environ 300 μ def dans l'ESG10, soit du même ordre de grandeur que trouvé en laboratoire sur le même matériau. Par ailleurs, la comparaison des mesures de jauges entre conditions sèche et humide montre que l'une des conséquences du gel dans les enrobés est la création de déformations horizontales différentielles entre couches. Pour retrouver ces effets, les simulations demandent à affaiblir le « frettage » entre ESG10 et GB20 traduisant un certain travail de l'interface. Des résultats expérimentaux de certaines jauges TML ont aussi permis de détecter des réponses atypiques à partir du second cycle thermique réalisé en condition humide s'apparentant à des observations de laboratoire antérieures. Ces signaux particuliers résultent sans doute de fissures et/ou délaminage locaux à proximité des jauges concernées. Les essais AMAC réalisés en fin d'essai dans cette zone montrent d'ailleurs une diminution significative de la résistance d'interface en liaison possible avec les trois points précédents.

Malgré les nombreux chargements mécaniques réalisés en condition humide et avec cyclage de la température, aucune dégradation visible en surface n'a été observée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les dégradations sévères comme les nids-de-poule sont plus typiquement signalées sur des chaussées ayant quelques années de service. Une seconde explication est en lien avec le fait que les phases relativement longues de gel ont entraîné une forte augmentation de portance des couches granulaires et une forte atténuation des effets mécaniques sous charges roulantes.

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Programme d'essais réalisé	2
3	Conventions de signe.....	4
4	Considérations préliminaires	5
4.1	Module complexe des enrobés bitumineux de l'essai et calage du modèle de Huet.....	5
4.2	Modules d'Young des couches non-liées	8
4.3	Modélisation viscoélastique de la couche d'accrochage.....	8
4.4	Modélisation du contact horizontal entre couches d'enrobés et de matériau granulaire sous sollicitation thermique « lente ».....	9
4.5	Liste des codes et outils numériques développés.....	10
4.6	Correction thermique apportée aux mesures de déformation des jauges TML 12	
5	Mégaphase B : Cycliques thermiques en conditions sèches (+5°C à -10°C) 14	
5.1	Cycles thermiques : mesures expérimentales	14
5.1.1	Évolution de la température dans les thermistances.....	14
5.1.2	Déformation des couches bitumineuses sous cycle thermique (cycle #4, MP B). 20	
5.2	Mégaphase B : modélisations numériques thermique et mécanique, comparaison avec les résultats d'essais	23
5.2.1	Calcul de la température dans les couches bitumineuses	23
5.2.2	Calcul des déformations d'origine thermique dans les couches bitumineuses (cycle #2, essai B).....	26
6	Mégaphase C : Chargement mécanique en conditions sèches pour T _{interface} =20°C.....	31
6.1	Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai C7).....	32
6.2	Comparaison entre mesures et modélisations mécaniques sous charge roulante (phase d'essai C7)	35

6.2.1	Définition de la structure et des propriétés mécaniques des couches	35
6.2.2	Modélisation du chargement	36
6.2.3	Résultats de la comparaison essai / modèle avec interface viscoélastique.....	37
7	Mégaphase D : Chargement mécanique en conditions sèches pour T_interface=5°C.....	43
7.1	Profils de température mesurés par les thermistances	43
7.2	Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai D13, Q=40 kN).....	45
7.3	Comparaison entre résultats de l'essai D13 et calculs ViscoRoute© 2.0 50	
8	Mégaphase E_intermédiaire : Chargement mécanique en conditions sèches pour T_interface=0°C.....	54
8.1	Profils de température mesurés pendant l'essai E1_inter.....	54
8.2	Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai E1_inter, Q=40 kN)	54
8.3	Comparaison entre résultats de l'essai E1_inter et calculs ViscoRoute© 2.0	56
9	Mégaphase E : Chargement mécanique en conditions sèches pour T_interface=-10°C.....	59
9.1	Profils de température pendant l'essai E18	59
9.2	Déflexion et déformations longitudinale et transversale en bas de GB20 sous charge roulante (essai E18, Q=40 kN) - modélisations.....	59
10	Synthèse des mégaphases réalisées en conditions sèches	62
10.1	Déformations maximales mesurées en bas de GB20 sous charge roulante en fonction de la température	62
10.2	Déformations extrémales mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 sous charge roulant en fonction de la température ..	62
10.3	Récapitulatif des principales observations faites en conditions sèches 63	
11	Mégaphase F : Mouillage de la structure	66
11.1	Calibration de laboratoire à l'Université Laval.....	66
11.2	Préparation de la fosse pour l'augmentation du degré de saturation de la couche de surface	70
11.3	Calibration et validation initiale sur la fosse expérimentale	75
11.4	Suivi de la teneur en eau dans la couche de ESG10 durant l'essai ...	86

11.5	Suivi de la teneur en eau dans les couches non liées et dans le sol d'infrastructure durant l'essai	87
12	Mégaphase G intermédiaire : Chargement mécanique en conditions mouillées ($T_{interface}=5^{\circ}C$)	92
13	Mégaphase G : Cycles de gel/dégel en condition humide ($+5^{\circ}C$; $-10^{\circ}C$; $+5^{\circ}C$) sans chargement mécanique.....	95
13.1	Évolution de la température dans la chaussée pendant les cycles thermiques	95
13.2	Vue d'ensemble des déformations dans les couches d'enrobé pendant les trois cycles de gel/dégel	98
13.3	Effets de l'eau et du gel sur les déformations en bas d'ESG10 et de GB20	101
13.4	Premières modélisations et comparaison avec les résultats d'essais	103
13.4.1	Effet d'une déformation de gonflement dans l'ESG10.....	107
13.4.2	Effet du relâchement du « frettage apparent » en bas de GB20	107
13.4.3	Introduction d'un glissement partiel entre couches d'enrobé	108
13.4.4	Sollicitation au niveau de l'interface	109
13.4.5	Récapitulatif des premiers résultats de simulation et comparaison avec les mesures de jauge	110
13.5	Effets additionnels et modélisations associées.....	112
13.5.1	Effet d'une saturation partielle de la couche de GB20	112
13.5.2	Modification des conditions de frettage en cours de cycle de gel-dégel.....	113
13.5.3	Effets localisés vus au niveau des jauges longitudinales TML_229 et TML_391.	114
13.6	Récapitulatif des principales observations sur les cycles de gel-dégel en conditions humides sans charge mécanique	116
14	Mégaphase G : cycles de gel/dégel avec passages de charges répétées en conditions humides ($+5^{\circ}C$; $-10^{\circ}C$).....	119
14.1	Évolution des déformations pendant la phase de remontée en température du cycle #6.....	120
14.2	Comparaison avec les essais effectués à l'état sec	121
14.2.1	Comparaison entre les MP E et G à $T_{interface} \approx -10^{\circ}C$	121
14.2.2	Comparaison entre les MP D et G à $T_{interface} \approx 5^{\circ}C$	123

14.2.3	Comparaison entre les MP Einter et G à $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$, avec MG20 et MG112 gelés pour MP G	125
14.2.4	Comparaison entre les MP Einter et G à $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$, avec MG20 et MG112 non gelés pour MP G	127
14.3	Résumé pour la MP G avec passages de charges roulantes	129
15	Auscultation mécanique sur la chaussée pendant les mégaphases	130
15.1	Défectomètre à masse tombante	130
16	Suivi de l'orniérage pendant l'essai d'endommagement accéléré	136
17	Auscultation destructive finale	144
17.1	Carottage	144
17.2	Essais AMAC	147
18	Récapitulatif des mesures d'auscultation recueillies pendant et à la fin de l'essai	151
19	Conclusion générale	154
20	Remerciements	158

Liste des Figures

Figure 1: description des mégaphases de l'essai (Q correspond à la charge appliquée sur le jumelage du simulateur). La colonne « comparaison » indique les résultats d'essais qui peuvent être spécifiquement comparés entre eux (même couleur même numéro).	2
Figure 2: Représentation dans le plan de Cole et Cole du module complexe des mélanges bitumineux ESG10, GB20 et BBSG.....	6
Figure 3: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 2 de MP B.	15
Figure 4: Profils de températures mesurés dans les EB à différents instants du cycle 2 de MP B.16	
Figure 5: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 2 de MP B.	16
Figure 6: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 3 de MP B.	17
Figure 7: Profils de température mesurés dans les EB à différents instants du cycle 3 de MP B. 18	
Figure 8: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 3 de MP B.	18
Figure 9: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 4 de MP B.	19
Figure 10: Profils de température mesurés dans les EB à différents instants du cycle 4 de MP B.	19
Figure 11: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 4 de l'essai B.	20
Figure 12: Évolution de la déflexion de surface pendant le cycle #4 de MP B	21
Figure 13: Déformations mesurées en bas de GB20 dans la direction longitudinale (jauges TML_390 et TML_391) et transversale (jauges TML_392 et TML_393) pendant le cycle #4 de MP B.....	22
Figure 14: Réponse de l'interface dans les directions longitudinale et transversale pendant le cycle #4 de l'essai B.	22
Figure 15: Structure bicouche modélisée.....	24
Figure 16: température mesurée par les thermistances dans les enrobés et comparaison avec les courbes numériques (phase de descente en température).....	25

Figure 17: température mesurée par les thermistances dans les enrobés et comparaison avec les courbes numériques (phase de remontée en température).	25
Figure 18: Maillage de la structure, position des capteurs numériques et conditions aux limites de calcul.....	27
Figure 19: Évolution des déformation mesurée et calculée sans condition de frettage (glissement parfait), à la base de la couche de ESG10 et GB20 dans les directions longitudinale et transversale. Nota : toutes les courbes numériques (en pointillés) sont ici confondues.....	28
Figure 20: Évolution des déformations mesurée et calculée à la base de la couche de ESG10 et de GB20 dans les directions longitudinale et transversale avec condition de frettage.....	29
Figure 21: Évolution des déformations mesurée et calculée dans le bicouche bitumineux dans les directions longitudinale et transversale avec condition de frettage.	30
Figure 22: Profil de température vertical dans la structure de chaussée pendant l'essai C7 (températures issues de deux chapelets de thermistances différents).	32
Figure 23: Déflexion de surface pendant le passage #1 de l'essai C7	33
Figure 24: Déformations mesurées à la base de GB20 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai C7.	33
Figure 25: Déformations mesurées à la base de ESG10 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai C7.	34
Figure 26 : Déformations longitudinales de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20.....	35
Figure 27 : Déformations transversales de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20.	35
Figure 28 : Propriétés mécaniques des couches de la structure.....	36
Figure 29: Chargement appliqué sur la structure de chaussée - simulation du jumelage de l'accélérateur de trafic.	36
Figure 30: Comparaison entre les déflexions de surface mesurée (potentiomètre 2) et calculée lors du passage #5 de l'essai C7.	38
Figure 31: Représentation 2D et 3D de la déflexion lors du passage des roues.	38
Figure 32: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées à la base de GB20 et dans les directions longitudinale et transversale (essai C7).	39
Figure 33: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai C7). NB : ces courbes sont tracées suivant des échelles différentes en ordonnée; les écarts sur les petites valeurs de déformations sont à relativiser.	40

Figure 34 : (a) construction approchée de la réponse d’une interface « viscoélastique-frottante » à partir des cas visqueux (courbe orange) et collé (courbe bleue) pour la jauge 233. 41

Figure 35 : réponses du modèle en déformation transversale (bas ESG10) pour des interfaces visqueuse et collée et points de transition pour la construction d’une interface « viscoélastique-frottante ». Ici le résultat d’une telle construction reste voisin du cas visqueux qui correspondait bien à la mesure de la jauge TML-230..... 42

Figure 36: Profil vertical de température dans la structure de chaussée pendant la phase d’essai D13. 44

Figure 37: Profil vertical de température dans la structure de chaussée pendant la phase d’essai D14. 44

Figure 38: déflexion de surface mesurée pendant le premier passage de charge de l’essai D13. 45

Figure 39 : Déformations mesurées en bas de GB20 dans les directions longitudinale et transversale sous le premier passage de l’essai D13. 46

Figure 40: Déformations mesurées à la base de GB20 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l’essai D13. 46

Figure 41: Comportement de l’interface ESG10/GB20 dans la direction longitudinale pendant le passage #1 de l’essai D13. NB : l’effet double pics de faible amplitude vu sur les courbes en bas de ESG10 se produit sous le passage d’une seule roue (gauche ou droite) et n’est pas lié à un « effet tandem ». 47

Figure 42: Comportement de l’interface ESG10/GB20 dans la direction transversale pendant le passage #1 de l’essai D13. 47

Figure 43 : extensions maximales longitudinale et transversale en bas de GB20 en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l’origine. 48

Figure 44 : extension (haut GB20) et contraction (bas ESG10) longitudinales extrémales en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l’origine..... 49

Figure 45 : extension (haut GB20) et contraction (bas ESG10) transversales extrémales en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l’origine. 49

Figure 46: Comparaison entre les déflexions de surface calculée et mesurée lors du passage #1 de l’essai D13, $T_{interface}=5^{\circ}C$ 50

Figure 47: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées en bas de GB20 dans les directions longitudinale et transversale (essai D13, $T_{interface}=5^{\circ}C$). 51

Figure 48 : Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai D13, T_interface=5°C).	52
Figure 49 : (a) comparaison essai versus ViscoRoute© 2.0 pour la TML_233 en considérant des interfaces visqueuse ou collée dans les calculs. (b) Construction approchée de la réponse pour un comportement d'interface « visqueux-frottant », la zone frottante (modélisée par la solution avec interface toute collée) s'étend sur ± 15 cm de part et d'autre du centre de charge.	53
Figure 50: Profil de température dans la structure de chaussée pendant l'essai E1_inter.	54
Figure 51: Déflexion de surface pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.....	55
Figure 52: Déformations mesurées à la base de GB20 dans les directions longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.	55
Figure 53: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction longitudinale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.....	56
Figure 54: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction transversale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.....	56
Figure 55: Comparaison entre les déflexions de surface calculée et mesurée lors du passage #1 de l'essai E1_inter.....	57
Figure 56: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées à la base de GB20 et dans la direction longitudinale et transversale (essai E1_inter).....	57
Figure 57: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai E1_inter).....	58
Figure 58: Profil de température dans la structure de la chaussée pendant l'essai E18.	59
Figure 59 : déflexions mesurée et calculées avec ViscoRoute© 2.0 pour les hypothèses de couches granulaires (MG20 et MG112) non gelées et gelées.....	60
Figure 60 : déformations longitudinale et transversale en bas de GB20 mesurées et calculées avec ViscoRoute© 2.0 pour les hypothèses de couches granulaires (MG20 et MG112) non gelées et gelées.....	61
Figure 61 : extensions longitudinale et transversale maximales sous charge roulante (40 kN) mesurées en bas de GB20 en fonction de la température.	62
Figure 62 : déformations longitudinales maximales en haut de GB20 (extension) et en bas de ESG10 (contraction) sous charge roulante (Q = 40 kN) en fonction de la température dans les couches d'enrobé bitumineux : comparaison entre mesures et calculs ViscoRoute© 2.0 effectués pour les hypothèses d'interface ESG10/GB20 collée ou visqueuse.....	63

Figure 63. Plaques de ESG10 préparées par le MTQ.....	67
Figure 64. Chambre de pression/vide utilisée pour la saturation des plaques de ESG10.....	68
Figure 65. Relation entre le degré de saturation et la valeur mesurée au percomètre	70
Figure 66. Schéma conceptuel du bassin permettant d’immerger la surface de la chaussée	71
Figure 67. Trait de scie pour l’insertion de la paroi transversale du bassin.....	72
Figure 68. Exemple de joints mis en œuvre dans le bassin.....	73
Figure 69. Bassin mis en place pour le processus de saturation (1).....	73
Figure 70. Bassin mis en place pour le processus de saturation (2) et panneaux de contreplaqués	74
Figure 71. Ajout d’eau dans le bassin.....	75
Figure 72. Position des points de mesure au percomètre et à la sonde Capa sur la planche expérimentale relatif à la distribution des vides dans la couche de surface	76
Figure 73. Position des points de mesure au percomètre et à la sonde Capa sur la planche expérimentale relatif à la distribution des vides dans la couche de surface et à la position des roues	77
Figure 74. Marquage des points de mesures pour la sonde Capa et le percomètre afin d’estimer la teneur en eau	78
Figure 75. Relation entre les valeurs P et les valeurs ME4 sur la planche expérimentale.....	81
Figure 76. Relation entre les valeurs moyennes P et les valeurs moyennes ME4 sur la planche expérimentale	82
Figure 77. Exemples de corrélations basées sur l’approche locale par point de mesure.....	83
Figure 78. Valeurs moyennes de Sr obtenues selon les quatre approches considérées	85
Figure 79. Suivi de la teneur en eau moyenne dans la couche de ESG10 durant la séquence méthodologique	87
Figure 80. Position en plan des jauges de teneur en eau (rappel).....	88
Figure 81. Valeurs de teneur en eau volumétrique mesurées avec les sondes EC-5 (Decagon) – Cycle de saturation du 8 au 12 janvier 2021	89
Figure 82. Valeurs de teneur en eau volumétrique mesurées avec la sonde PR6.....	91
Figure 83: Profil de température dans la structure de chaussée au début de l'essai G_intermédiaire.	92

Figure 84 : Signaux de déformation longitudinale (TML_390) et transversale (TML_392) en bas de GB20 au passage de la charge roulante enregistrés lors des essais D13 (bleu) et G_intermédiaire (orange).....	93
Figure 85 : Signaux de déformation longitudinale et transversale de part et d'autre de l'interface au passage de la charge roulant enregistrés au cours des essais D13 (bleu) et G_intermédiaire (orange).....	94
Figure 86 : évolution de la température au cours du temps pour les 3 cycles de gel-dégel en condition humide (mégaphase G, thermistances dans les EB chapelet C1)	95
Figure 87 : Évolution de la température près de l'interface ESG10/GB20 pendant le cycle #1 de l'essai G.....	96
Figure 88 : Profils de température enregistrés dans l'EB à différents instants du premier cycle de l'essai G.....	97
Figure 89 : Profils de température enregistrés dans les couches non-bitumineuses à différents instants du premier cycle de l'essai G.	98
Figure 90 : déformation transversale en bas d'ESG10 (TML_230 et 231) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.	99
Figure 91: déformation longitudinale en bas d'ESG10 (TML_229, 232 et 233) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.....	99
Figure 92: déformation transversale en bas de GB20 (TML_392 et 393) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.	100
Figure 93: déformation longitudinale en bas de GB20 (TML_390 et 391) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.	100
Figure 94 : Positionnement des jauges longitudinales et transversales en bas des couches d'ESG10 et de GB20.....	101
Figure 95 : Comparaison sec (a) et humide (b) des déformations transversales en bas d'ESG10 et de GB20. Mise en évidence d'une différenciation significative des évolutions entre couches en présence d'eau et de gel.	102
Figure 96 : Comparaison sec/humide des déformations longitudinales en bas d'ESG10 (TML_229 et 232) et de GB20 (TML_390 et 391). Les jauges TML_232 et 390 sont situées aux mêmes coordonnées (x,y), idem pour TML_229 et 391.	103
Figure 97 : maillage des couches d'ESG10 et GB20 avec surface double au niveau de l'interface et ressorts nodaux dans les 3 directions	104

Figure 98 : fonction de pondération du gonflement $h(\theta)$	105
Figure 99 : Conditions aux limites en température des calculs EF 3D.....	106
Figure 100 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition sèche, (b) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$ (toute autre condition étant égale par ailleurs)	107
Figure 101 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$, (b) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$ et diminution par un facteur 3 des coefficients de frottement apparent f_{retLsol} et f_{retTsol}	108
Figure 102 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$ et réduction des coefficients f_{retLsol} et f_{retTsol} , (b) idem (a) + ressorts à l'interface entre couches d'enrobé pour simulation de conditions de glissement partiel.	109
Figure 103 : Profils longitudinaux du saut de déplacement vertical à l'interface ESG10/GB20 sous bande de roulement à deux instants pris pendant les phases de gel et de dégel. A gauche : cas d'une raideur verticale négligeable avec forte amplitude de saut de déplacement et faible effort d'arrachement; à droite : cas d'une raideur de l'ordre de 0.1 MPa/mm avec faible amplitude de saut de déplacement et effort d'arrachement significatif.	110
Figure 105 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec pas de temps de l'ordre de l'heure pour le cycle #1.	111
Figure 106 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec pas de temps de l'ordre de l'heure pour le cycle #2.	112
Figure 107 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec déformation de gonflement dans la GB20 et diminution de frottement en bas de GB20 (cycle #2).	113
Figure 108 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec déformation de gonflement dans la GB20 et raidissement du frottement entre ESG10/GB20 et en bas de GB20 (cycle #2).	114

Figure 109 : (haut) Déformations longitudinales et transversales en bas d'ESG10 et de GB20 aux cycles #2 et #3 montrant, pour les jauges longitudinales (TML_229 et 391), des réponses atypiques différentes de celles du cycle #1 et des jauges TML_232 et 390 aux cycles #2 et #3 (Figure 96b). (Bas) Rappel des courbes de température mesurées par les thermistances c1-2, c1-3 et c1_4 au cours des cycles #2 et #3. 116

Figure 110: Température de l'interface mesurée pendant les cycles de gel-dégel #6 et #7 et de chargement mécanique effectué à 65 kN. 119

Figure 111: Amplitude maximale de déformation mesurée à la base de la couche de GB20 pendant la phase de dégel du cycle #6 (nota : le numéro d'essai correspond à un passage de charge pris parmi l'ensemble des passages réalisés pour un même profil vertical de température). 120

Figure 112: Amplitudes maximales de déformation mesurées à l'interface pendant la phase de dégel du cycle #6. 121

Figure 113: Profil de température dans la structure de la chaussée pendant l'essai G(cycle#6, passage #7). 122

Figure 114: Déformations longitudinale (a) et transversale (b) mesurées en bas de GB20 pour les passages à $T_{interface} \approx -10^{\circ}\text{C}$ des MP E et G. 122

Figure 115: Comparaison entre les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 pendant les MP E et G à $T_{interface} \approx -10^{\circ}\text{C}$ 123

Figure 116: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage considéré en MP G (cycle#6, passage #400). 124

Figure 117: Déformations mesurées pour $T_{interface} \approx 5^{\circ}\text{C}$ pendant les MP D et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b). 124

Figure 118: Comparaison entre les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 pour les MP D et G à $T_{interface} \approx 5^{\circ}\text{C}$ 125

Figure 119: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage de la MP G(cycle#6, passage #193). 126

Figure 120: Déformations mesurées pour les MP Einter et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}\text{C}$ et matériaux granulaires gelés pour MP G). 126

Figure 121: Déformations mesurées pour les MP Einter et G de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}\text{C}$ et matériaux granulaires gelés pour MP G). 127

Figure 122: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage #33 (cycle #6) en MP G.....	128
Figure 123: Déformations mesurées pour les MP Einter et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}\text{C}$ et matériaux granulaires non gelés pour MP G).....	128
Figure 124: Déformations mesurées pour les MP Einter et G de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}\text{C}$ et matériaux granulaires non gelés pour MP G).....	129
Figure 125. Résultats des essais FWD post construction : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface (rappel)	131
Figure 126. Résultats des essais FWD suite à la Mégaphase E : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface.....	132
Figure 127. Résultats des essais FWD à la fin de l'essai : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface.....	133
Figure 128. Lignes transversales suivies en orniérage durant les essais.....	139
Figure 129. Évolution des profils transversaux durant les phases du projet.	140
Figure 130. Évolution de l'orniérage relatif durant l'essai d'endommagement accéléré : a) 10 février 2021, b) 8 avril 2021	142
Figure 131. Évolution de la profondeur d'ornière moyenne en fonction des ÉCAS accumulés durant la phase d'endommagement accéléré	143
Figure 132. Position des points de carottage	145
Figure 133. Position et réalisation des essais AMAC finaux.....	148
Figure 134. Répartition spatiale des contraintes maximales obtenues avec les essais AMAC à la fin du projet – Secteur des jauges TML 229 et 230	151

Liste des Tableaux

Tableau 1: Paramètres viscoélastiques du modèle Huet pour les matériaux ESG10 et GB20 et pour un BBSG typique pour couche de roulement utilisé en France. Les valeurs a_0 , a_1 et a_2 des matériaux EGG10 et GB20 sont déduites des valeurs τ_0 , A_1 , A_2 des mesures du MTQ.	6
Tableau 2 : Norme du module complexe de ces 3 matériaux pour les points de fonctionnement à 3 Hz pour quatre températures	7
Tableau 3 : Paramètres viscoélastiques du modèle Huet utilisés dans les calculs ViscoRoute pour les couches de ESG10 et GB20.	7
Tableau 4: Modules estimés pour les couches non-liées.	8
Tableau 5 : Paramètres viscoélastiques du modèle Huet pour la couche d'accrochage.	9
Tableau 6: Outils d'analyse et de post-traitement développés dans le cadre du projet.	11
Tableau 7 : Coefficients de compensation thermique pour les capteurs TML de l'essai.	13
Tableau 8 : Paramètres de modélisation pour les couches de ESG10 et GB20.	26
Tableau 9. Caractéristiques des plaques avant le début de la calibration de laboratoire	67
Tableau 10. Mesures expérimentales moyennes à l'Université Laval pour les deux plaques de ESG10.....	69
Tableau 11. Séquence d'actions pour la calibration relative des équipements de mesure	79
Tableau 12. Mesures sur la planche expérimentale avec la sonde Capa et le percomètre pour la calibration relative.....	80
Tableau 13. Valeurs moyennes de S_r obtenues selon les quatre approches considérées.....	85
Tableau 14. Teneur en eau volumétrique moyenne mesurée avec la sonde PR6 pour différentes profondeurs et différents moments dans la séquence méthodologique	91
Tableau 15 : Paramètres de modélisation du calcul EF 3D en condition sèche.....	106
Tableau 16. Données récapitulatives des paramètres d'entrée du modèle pour la simulation de la réponse des jauges au cours du second cycle de gel-dégel (hormis jauges TML_229 et TML_391).	110
Tableau 17. Conditions de comparaison entre l'état sec et humide pour différentes températures	121
Tableau 18. Indices et paramètres obtenus de l'analyse des bassins de déflexion à 40 kN corrigés pour la charge et la température	134

Tableau 19. Modules élastiques rétrocalculés avec BAKFAA.....	135
Tableau 20. Mesures d'ornières, accumulation du trafic et contexte de la prise des mesures .	137
Tableau 21. Répartition des cycles et des conditions de charges lors de l'essai d'endommagement accéléré	138
Tableau 22. Résultats des mesures de teneur en eau sur les carottes recueillies à la fin de la séquence méthodologique.....	146
Tableau 23. Résultats des essais AMAC réalisés à la fin de la séquence méthodologique	150

1 Introduction

Le projet « Durabilité des matériaux et des structures de chaussées sous l'effet du trafic et des conditions climatiques – Comportement des matériaux bitumineux vis-à-vis des cycles de gel et de dégel » a été initié à l'automne 2018 et représente une collaboration entre le Ministère des Transports du Québec, l'Université Gustave Eiffel et l'Université Laval. Le projet bénéficie de la synergie et de la complémentarité des installations de recherche uniques de l'Université Laval et des connaissances et outils de modélisation disponibles à l'Université Gustave Eiffel. Il a également reçu le soutien de la Direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM, France), concernée par le sujet, qui a permis de financer en partie le recrutement d'un postdoctorant. Un rapport intérimaire a été soumis au Ministère en février 2020 afin de faire le bilan de la construction de la section expérimentale et des premiers résultats. Le présent rapport présente l'analyse complète des résultats collectés et les analyses numériques associées permettant d'interpréter et de comprendre la réponse et le comportement de la structure de chaussée expérimentale.

2 Programme d'essais réalisés

Le protocole d'essais présenté dans le rapport intérimaire présenté au Ministère des Transports du Québec en février 2020 a été révisé et adapté lors de la réalisation des différentes phases d'essais pour enrichir la base de données des résultats expérimentaux et pour assurer une meilleure connaissance de la réponse de la structure. La mégaphase E_intermédiaire (enrobés à 0°C sec) a été ajoutée au programme initial. Elle vise à abaisser la température dans la fosse d'essai afin d'obtenir un bicouche d'enrobé gelé sur une fondation non gelée et de favoriser le gel en mégaphase E. La mégaphase G_intermédiaire (5°C humide) a également été ajoutée comme référence pour étudier la réponse de la chaussée sous chargement mécanique en présence d'eau liquide dans les couches d'enrobé, avant d'appliquer les cycles de gel/dégel. Les différentes mégaphases (MP) sont récapitulées dans le tableau de la Figure 1.

MP	Comparaison	P	Nom	Tinterf. (°C)	Q (kN)	Cond. surface
A		3	Initiation, Profils initiaux	20	-	sèche
B	I	5	Cycles thermiques (x3)	5 à -10	-	sèche
C	Reference sec	7	Réponse initiale (20 °C)	20	40	sèche
		8	Réponse initiale (20 °C)	20	50	sèche
		9	Réponse initiale (20 °C)	20	65	sèche
D	II	13	Réponse initiale (5 °C)	5	40	sèche
	III	14	Réponse initiale (5 °C)	5	50	sèche
	IV	15	Réponse initiale (5 °C)	5	65	sèche
		18	Réponse initiale (0 °C)	0	40	sèche
E_inter	III	19	Réponse initiale (0 °C)	0	50	sèche
	IV	20	Réponse initiale (0 °C)	0	65	sèche
		23	Réponse initiale (-10 °C)	-10	40	sèche
E	III	24	Réponse initiale (-10 °C)	-10	50	sèche
	IV	25	Réponse initiale (-10 °C)	-10	65	sèche
		28	Mouillage (à 15°C)	5	-	Mouillée
G_inter	II	30	Réponse intermediaire (5 °C)	5	40	Mouillée
G	I	34	Cyclage gel-dégel (X3)	5 à -10	-	Mouillée
	III	39	Cyclage G/D + charge continue 50 kN	5 à -10	50	Mouillée
	IV	40	Cyclage G/D + charge continue 65 kN	5 à -10	65	Mouillée

Figure 1: description des mégaphases de l'essai (Q correspond à la charge appliquée sur le jumelage du simulateur). La colonne « comparaison » indique les résultats d'essais qui peuvent être spécifiquement comparés entre eux (même couleur même numéro).

La comparaison entre les différentes phases de l'essai est organisée de la manière suivante :

- Comparaison I : effet des cycles thermiques purs sur la réponse des couches liées sous états sec et humide.

- Comparaison II : effet du chargement roulant sur la réponse des couches d'enrobé sous états sec et humide pour la température de 5°C.
- Comparaisons III et IV : idem comparaison II avec cycles de gel/dégel pour l'état humide. Les comparaisons III et IV diffèrent par les niveaux de charge appliqués.

3 Conventions de signe

Pour les analyses subséquentes, dans l'objectif d'être cohérent avec les outils utilisés, l'axe z est compté positivement vers le haut. Le gradient vertical d'une quantité croissante vers le haut est considéré positif. Les contraintes de traction sont positives ainsi que les déformations d'extension.

4 Considérations préliminaires

La présente section regroupe les principales informations qui sont essentielles pour effectuer des analyses numériques et l'interprétation des données. Notamment, les aspects suivants sont traités :

- Les résultats d'essais de module complexe en laboratoire réalisés au Québec et le calage du modèle de Huet sur ces essais.
- Les valeurs de module d'Young retenues pour les matériaux granulaires dans les calculs ViscoRoute de ce rapport.
- La modélisation du comportement viscoélastique de la couche d'accrochage également utilisée dans les calculs ViscoRoute.
- La liste des principaux outils de post-traitement des fichiers de sortie d'essais et codes de calcul développés et utilisés au cours de ce projet.
- Les corrections thermiques apportées aux mesures des jauge de déformation TML.

4.1 Module complexe des enrobés bitumineux de l'essai et calage du modèle de Huet

Les essais de module complexe en traction-compression ont été effectués à la direction des matériaux d'infrastructures du MTQ dans le but de caractériser le comportement viscoélastique des couches bitumineuses (ESG10 et GB20). Les matériaux de l'étude ont été prélevés lors de la réalisation de la planche expérimentale à l'Université de Laval. Quatre éprouvettes d'enrobé ont été confectionnées pour chaque type de matériau.

Les résultats du calage du modèle de Huet sur ces résultats d'essais sont présentés dans le Tableau 1. Les valeurs des paramètres obtenues sont comparées aux propriétés viscoélastiques d'un enrobé classique pour couche de surface utilisé en France (BBSG = béton bitumineux semi-grenu). Pour rappel, le module complexe du modèle de Huet est donné par :

$$E^*(\omega\tau) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad \text{avec} \quad \tau = \exp(a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2) \quad (1)$$

Les paramètres a_0 , a_1 et a_2 sont ici les coefficients de la loi de translation temps-température utilisée en France et en données d'entrée du logiciel ViscoRoute© 2.1.

Tableau 1: Paramètres viscoélastiques du modèle Huet pour les matériaux ESG10 et GB20 et pour un BBSG typique pour couche de roulement utilisé en France. Les valeurs a_0 , a_1 et a_2 des matériaux EGG10 et GB20 sont déduites des valeurs τ_0 , A_1 , A_2 des mesures du MTQ.

	E_∞ ($\phi = 7\%$)	h	k	δ	a_0	a_1	a_2
ESG10 (MTQ)	28 800	0.545	0.188	2.215	-0.971	-0.342	0.00189
GB20 (MTQ)	31 200	0.538	0.183	2.295	0.406	-0.353	0.00189
BBSG (France)	34862	0.65	0.22	1.96	2.828	-0.344	0.00165

La comparaison entre ces trois matériaux dans le plan Cole-Cole est illustrée sur la Figure 2. Les points de fonctionnement à 5, 0, -10°C privilégiés dans les essais en fosse sont indiqués sur cette figure.

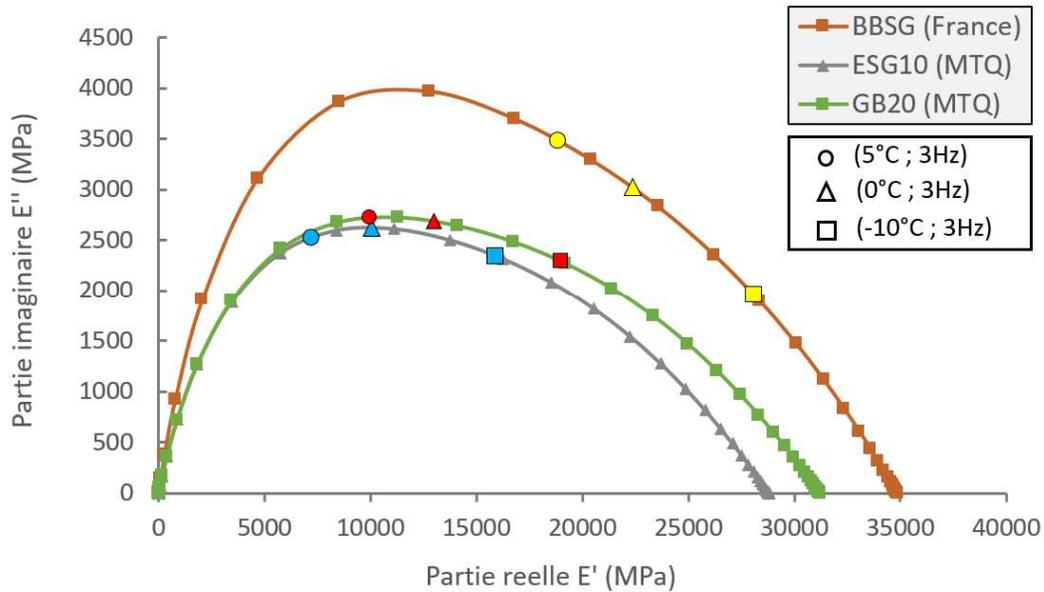


Figure 2: Représentation dans le plan de Cole et Cole du module complexe des mélanges bitumineux ESG10, GB20 et BBSG.

Tableau 2 : Norme du module complexe de ces 3 matériaux pour les points de fonctionnement à 3 Hz pour quatre températures

	E* (MPa)			
	[3Hz; -10°C]	[3Hz; 0°C]	[3Hz; 5°C]	[3Hz; 20°C]
ESG10 (MTQ)	16058	10367	7647	1992
GB20 (MTQ)	19133	13263	10335	3324
BBSG (France)	28139	22564	19181	8327

En général, les matériaux bitumineux utilisés en France sont plus rigides à mêmes température et fréquence. Comme le montre la valeur de a_0 pour ces trois matériaux (Tableau 1), les enrobés français présentent en particulier un temps caractéristique de relaxation plus élevé conduisant à une plus lente relaxation des contraintes sous charge « rapide » liée au trafic ou aux passages des charges du simulateur.

Il est à noter cependant que les calculs ViscoRoute présentés par la suite ont été réalisés sans disposer de ces mesures. Les paramètres des couches viscoélastiques utilisés en entrée de ViscoRoute ont été déterminés par calage inverse de certains résultats d'essais sous charge roulante et sont présentés dans le (Tableau 3). Ces valeurs sont sensiblement différentes de celles mesurées en laboratoire (Tableau 1). Cependant, il va s'avérer nécessaire par la suite d'introduire une interface viscoélastique entre les deux couches d'enrobé pour pouvoir bien rendre compte du comportement de la structure sous charge roulante. Les propriétés mécaniques de cette interface sont également déterminées par calage inverse.

Tableau 3 : Paramètres viscoélastiques du modèle Huet utilisés dans les calculs ViscoRoute pour les couches de ESG10 et GB20.

	E_∞ ($\phi = 7\%$)	h	k	δ	a_0	a_1	a_2
ESG10 (m-MTQ)	25 000	0.494	0.166	2.740	-1.737	-0.356	0.00178
GB20 (m-MTQ)	25 000	0.491	0.164	2.424	-1.313	-0.359	0.00197

4.2 Modules d'Young des couches non-liées

Les modules du sol, de la couche de fondation (MG20) et de la couche de sous-fondation MG112 ont été déterminés en partie par un rétro-calcul des mesures FWD (BAKFAA) effectuées à la réception de la structure. Des modifications ont été apportées à celles-ci dans le but de bien caler la déflexion de surface calculée par ViscoRoute sous charge roulante avec celle de l'essai de référence C7. Les modules des couches non liées ainsi retenus (hors effet de gel) sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4: Modules estimés pour les couches non-liées.

E_{MG20} (MPa)	E_{MG112} (MPa)	E_{sol} (MPa)
190	160	136

4.3 Modélisation viscoélastique de la couche d'accrochage

Pour obtenir un bon calage avec les déformations mesurées par les jauges TML au cours de l'essai de référence C, il a été nécessaire d'introduire, dans les simulations ViscoRoute effectuées avec les données précédentes, une interface viscoélastique entre les deux couches d'enrobé. Celle-ci permet en particulier de rendre compte de déformations horizontales différentes de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 (voir la section 6.1) comme observé au cours de cet essai.

Cette interface est modélisée par une couche mince viscoélastique de Huet dont les propriétés sont prises proches de celles d'un bitume. Les paramètres viscoélastiques du modèle de Huet utilisé pour décrire les matériaux de la couche d'accrochage sont résumés dans le tableau suivant. Ceux-ci permettent en particulier de rendre compte de façon satisfaisante de l'effet de température sur la rigidité de l'interface dans les modélisations ViscoRoute© 2.0 présentées dans la suite. Il est aussi à noter que dans une telle modélisation seul le ratio « épaisseur/module » (e/E_{∞}) est déterminant au premier ordre. L'épaisseur est fixée arbitrairement dans la suite à 0.5 mm, la valeur E_{∞} considérée ici en découle par calage inverse des mesures sous charges roulantes. On peut noter au passage que la valeur de 900 MPa obtenue (E_{∞}) est cohérente avec les propriétés mécaniques de bitumes.

Tableau 5 : Paramètres viscoélastiques du modèle Huet pour la couche d'accrochage.

	e (mm)	E_{∞} (MPa)	h	k	δ	a_0	a_1	a_2
Couche d'accrochage	0.5	900	0.78	0.25	3.79	-1.5	-0.38	0.00231

Le comportement viscoélastique des couches d'accrochage a déjà été rapporté dans la littérature. On peut citer notamment (Grellet et al., 2018)(Duong et al., 2019)¹.

4.4 Modélisation du contact horizontal entre couches d'enrobés et de matériau granulaire sous sollicitation thermique « lente »

Comme vu plus loin, le comportement mécanique des couches d'enrobé sous chargement thermique exhibe une forte anisotropie structurelle se traduisant au niveau des jauges par des déformations longitudinales faibles devant les déformations transversales. A priori, cet effet ne résulte pas d'une anisotropie « matériau » comme le démontra la comparaison sous charge roulante des mesures de déformations avec les simulations. Nous l'imputons plutôt aux conditions de frottement à l'interface GB20/MG20 en combinaison avec la faible rigidité des enrobés sous sollicitation lente et la « petite » largeur de la planche d'essai.

En effet, considérons à titre d'exemple le cas d'une poutre de longueur L , de poids surfacique ρgH , de module d'Young E et de coefficient de dilatation α en contact frottant de type Coulomb (d'angle ϕ) avec un plan horizontal soumise à une variation de température $\Delta\theta$. La condition de non glissement de la poutre en tout point de sa longueur est donnée par l'inégalité :

$$\underbrace{E\alpha|\Delta\theta|H}_{\text{intensité de l'effort normal thermique}} < \underbrace{\rho gHL \operatorname{tg}\phi}_{\text{résultante des efforts de cisaillement}} \quad (2)$$

conduisant à la longueur minimale L_{min} de non glissement :

¹ Duong, Ngoc Son, Juliette Blanc, Pierre Hornych, Benoît Bouveret, Jean Carroget, and Yann Le feuvre. 2019. "Continuous Strain Monitoring of an Instrumented Pavement Section." International Journal of Pavement Engineering 20 (12). <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1432859>.

Damien Grellet, Guy Doré, Olivier Chupin, and Jean Michel Piau. 2018. "Highlighting of the Viscoelastic Behaviour of Interfaces in Asphalt Pavements—a Possible Origin to Top-down Cracking." Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1418721>.

$$L_{min} = \frac{E\alpha|\Delta\theta|}{\rho g \operatorname{tg}\phi} \quad (3)$$

Pour $\rho g \approx 25000 \text{ N/m}^3$, $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\operatorname{tg}\phi \approx 1/\sqrt{3}$, $|\Delta\theta| = 10^\circ\text{C}$ on obtient :

$$L_{min} \approx 0.014 \times E \text{ (MPa)} \quad (4)$$

Ce calcul montre qu'un module d'Young de l'ordre de $E \approx 300 \text{ MPa}$ pour un enrobé sous sollicitation lente, qui conduit à $L_{min} \approx 4 \text{ m}$ compris entre la largeur et la longueur de la planche d'essai, peut justifier d'un comportement de la chaussée différent dans les directions transversale et longitudinale.

Afin d'éviter dans la suite des calculs non linéaires aux éléments finis nécessités par la loi de Coulomb, on approxime celle-ci par des conditions de contact élastique modélisées au moyen de ressorts horizontaux entre GB20 et MG20. La raideur K_f des ressorts est obtenue par calage inverse des mesures de déformation sous cycle thermique.

4.5 Liste des codes et outils numériques développés

Les principaux outils numériques développés et utilisés dans le cadre de ce projet sont présentés dans le Tableau 6. Certains de ces outils ont pour principal but de faciliter le post-traitement des résultats expérimentaux. Les autres sont des codes de calcul semi-analytique ou par éléments finis permettant de simuler les réponses thermique ou mécanique de la chaussée au cours des mégaphases de l'essai. L'ensemble participe à la calibration et à l'analyse des signaux enregistrés.

Tableau 6: Outils d'analyse et de post-traitement développés dans le cadre du projet.

Numéro code	Fonctionnalité	Fichier	
		Entrée	Sortie
1	Préparer un fichier de résultats Labview pour d'autres outils de post-traitement	*.lvm	*.txt ou *.csv
2	Calibration et post traitement d'un essai de cyclage thermique	*.txt	*.png et *.txt
3	Calibration et post traitement d'un essai de chargement mécanique	*.txt	*.png et *.txt
4	Imposer les conditions aux limites d'une charge roulante sur un maillage 3D	*.geo (script GMSH)	*.geo et *.mesh
5	Tracer un champ de résultat ViscoRoute en 3D	*.res	*.png
6	Interpolation par krigeage des mesures 2D (ex : mesure au banc Gamma)	*.txt *.csv (X,Y,champ)	*.png
7	Code de calcul EF3D pour un essai de charge roulante (sur Freefem++)	*.mesh	*.txt (ε à X,Y et Z)
8	Code de calcul EF3D pour un essai G/D sur bicouche bitumineuse à l'état sec et mouillé	*.mesh et *.txt (C.L. en température)	*.txt (T et ε à X,Y et Z)

Les simulations du comportement mécanique de la structure sous passages de l'essieu du simulateur sont effectuées avec le logiciel Viscoroute© 2.0 qui permet de calculer la réponse tridimensionnelle d'une structure multicouche viscoélastique (modèle de Huet) sous charge roulante, à vitesse constante V , par résolution semi-analytique (Chabot et al., 2010; Chupin et al., 2010)².

² Chabot, Armelle, Olivier Chupin, Lydie Deloffre, and Denis Duhamel. 2010. "ViscoRoute 2.0: A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement." Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>.

Chupin, O., A. Chabot, J. M. Piau, and D. Duhamel. 2010. "Influence of Sliding Interfaces on the Response of a Layered Viscoelastic Medium under a Moving Load." International Journal of Solids and Structures.

Les simulations thermiques (calcul des champs de température et calcul des champs de déformation induits par dilatation/contraction thermique et effet de gel) sont effectuées par éléments finis à l'aide de scripts développés au sein de l'environnement Freefem++ (Hecht, 2012) (V. T. Vu et al., 2020)³.

4.6 Correction thermique apportée aux mesures de déformation des jauges TML

Les jauges TML sont auto-compensées par rapport à un certain matériau de référence (en l'occurrence vis-à-vis des bétons hydrauliques pour les jauges utilisées ici). Pour revenir à la déformation réelle, ε , dans les enrobés (déformation mécanique + déformation thermique), il faut donc gommer cette auto compensation en ajoutant le terme $C_\beta \Delta T$ aux mesures effectuées, où la valeur de C_β est fournie avec la jauge (voir les coefficients de dilatation de l'ordre de $C_\beta \approx 11 \times 10^{-6} / ^\circ C$ dans le tableau ci-dessous). Par ailleurs, la correction de la dérive thermique de la jauge elle-même est réalisée au travers d'un coefficient de calibration C_ε fonction de la température. Ceci conduit à la formule ci-dessous de correction de la mesure, ε_{jauge} , donnée par la jauge qui sera systématiquement appliquée dans ce rapport pour les sollicitations thermiques.

$$\varepsilon = C_\varepsilon \times \varepsilon_{jauge} + C_\beta \times \Delta T \quad (5)$$

$\Delta T = T_{mesure} - T_{ref}$ avec T_{mesure} = température au niveau de la jauge (donnée dans l'essai par la thermistance placée à la profondeur la plus proche du capteur TML) et T_{ref} = température de référence correspondant à la température de la jauge lors de sa mise à zéro. En général, T_{ref} est choisie égale à la température de début de cycle thermique de l'ordre de 5°C.

<https://doi.org/10.1016/j.ijstr.2010.08.020>.

³ Hecht, F. (2012). New development in freefem+. *Journal of Numerical Mathematics*, 20(3–4), 251–265.
<https://doi.org/10.1515/jnum-2012-0013>

Vu, V. T., Chupin, O., Piau, J. M., & Hammoum, F. (2020). Finite element modelling of partially saturated asphalt specimens subjected to frost—towards an explanation of winter potholes. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1843036>

Nota : pour les mesures sous charge roulante pour lesquelles les variations de température sont négligeables, la déformation mécanique est fournie par le delta de déformation avant et au moment du passage de la charge, soit :

$$\Delta\varepsilon = C_\varepsilon \times \Delta \varepsilon_{jauge} \quad (6)$$

Le coefficient C_β n'intervient donc pas dans ces circonstances.

Tableau 7 : Coefficients de compensation thermique pour les capteurs TML de l'essai.

Capteur	C_β ($\mu def / ^\circ C$)	Capteur	C_β ($\mu def / ^\circ C$)
TML_391	10.8	TML_338	10.9
TML_393	10.7	TML_232	10.9
TML_390	10.8	TML_234	10.7
TML_392	11	TML_231	11.1
TML_230	10.5	TML_238	11
TML_339	10.6	TML_233	10.5
TML_229	10.7	TML_389	10.9

5 Mégaphase B : Cycliques thermiques en conditions sèches (+5°C à -10°C)

Durant la mégaphase B du protocole d'essai, trois cycles valides (#2, 3 et 4) de montée/descente en température ont été appliqués sur la chaussée expérimentale sous condition de surface sèche. On présente d'abord la réponse de la chaussée enregistrée par l'instrumentation. Une modélisation thermique de ces essais est ensuite comparée aux mesures expérimentales.

5.1 Cycles thermiques : mesures expérimentales

5.1.1 Évolution de la température dans les thermistances

Dans cette section, nous montrons l'évolution de la température de l'interface ESG10/GB20, les profils de température verticaux dans les couches bitumineuses et dans les couches non bitumineuses pendant les différents cycles thermiques de l'essai B.

Cycle thermique #2

Pendant la phase de descente en température, une température de -10°C est visée en surface de chaussée.

La Figure 3 présente l'évolution de la température d'interface ESG10/GB20 au cours du cycle #2 d'une durée de 250 h. La température varie d'environ +5 à -9°C après 200h d'essai, se rapprochant ainsi de la température de -10°C visée. Les festons sur la courbe sont la conséquence du système de régulation thermique en surface de chaussée.

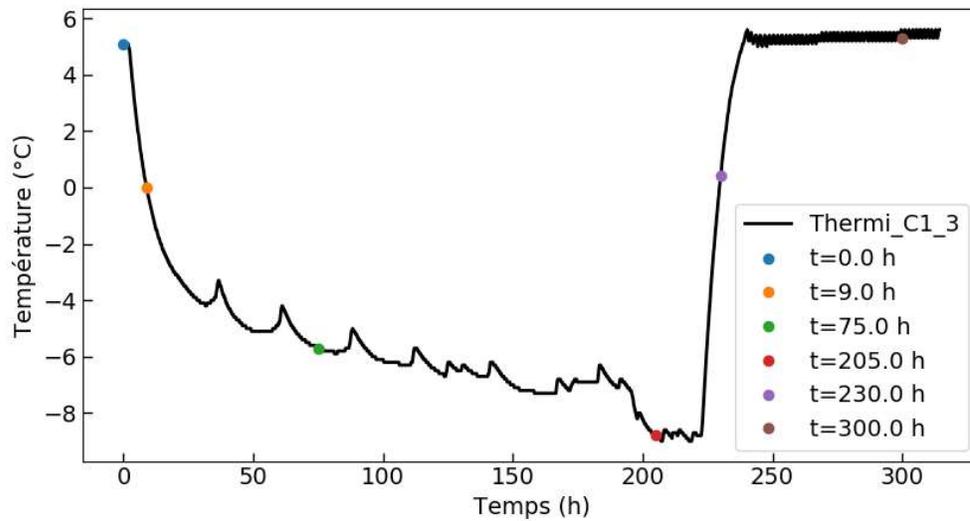


Figure 3: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 2 de MP B.

Les Figure 4 et Figure 5 montrent les profils verticaux de température à différents instants au cours du cycle #2. Au début de l'essai ($t=0$), la température est relativement homogène sur toute la profondeur de la structure et environ égale à 5°C , comme imposé en surface. Le gradient de température dans les couches bitumineuses est négatif au cours de la phase de descente en température et positif pendant la remontée (Figure 4). Son ordre de grandeur est de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

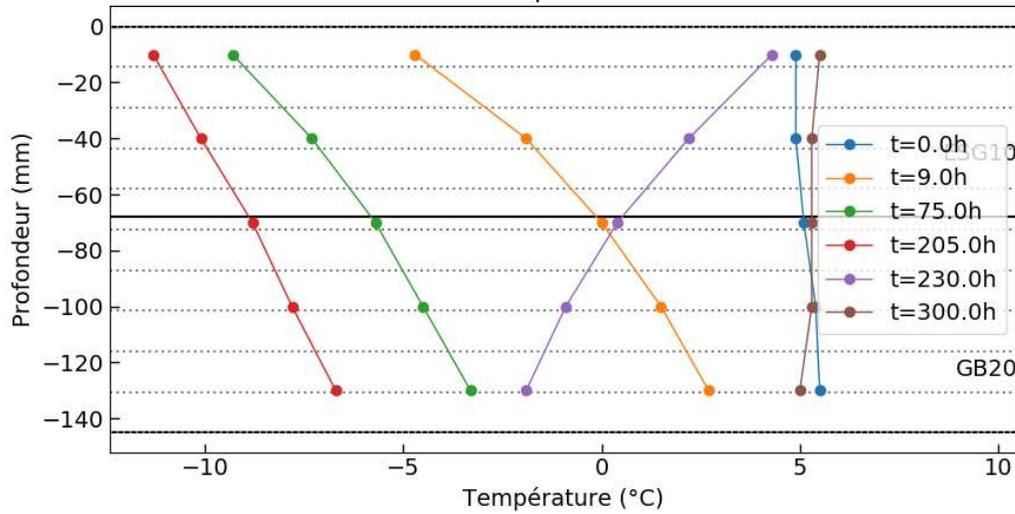


Figure 4: Profils de températures mesurés dans les EB à différents instants du cycle 2 de MP B.

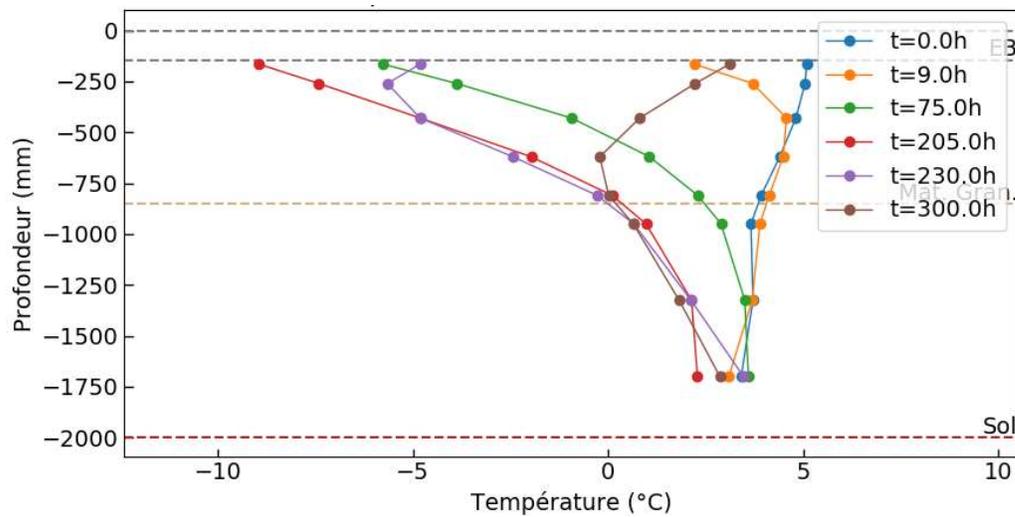


Figure 5: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 2 de MP B.

On remarque sur la Figure 5 que la température mesurée en fond de fosse reste à peu près constante tout au long de l'essai (entre 2 et 4°C). De façon générale, la température dans le sol ($-2000 \text{ mm} < z < -857 \text{ mm}$) reste positive au cours du cycle et varie entre 0 et 5°C tout en restant relativement homogène avec la profondeur. En revanche, la température évolue fortement dans les couches granulaires (MG20 et MG112) avec des valeurs pouvant être

négatives sur toute leur épaisseur et des gradients marqués ($\pm 0.2^\circ\text{C}/\text{cm}$) qui peuvent être de surcroît de signe opposé à un instant donné entre le haut et le bas de ces couches.

Des évolutions similaires sont observées pour les cycles thermiques #3 et #4. L'évolution de la température de l'interface et les profils verticaux de température sont montrés de la Figure 6 à la Figure 11. Dans la suite, on s'intéressera principalement à l'effet du cycle thermique #4 sur la déflexion de surface et les déformations horizontales dans les couches bitumineuses.

Cycle thermique #3

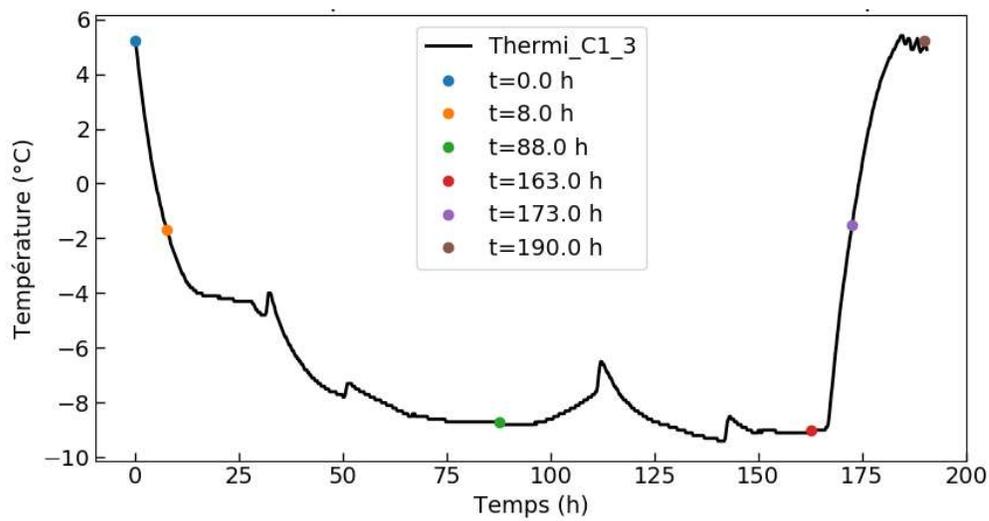


Figure 6: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 3 de MP B.

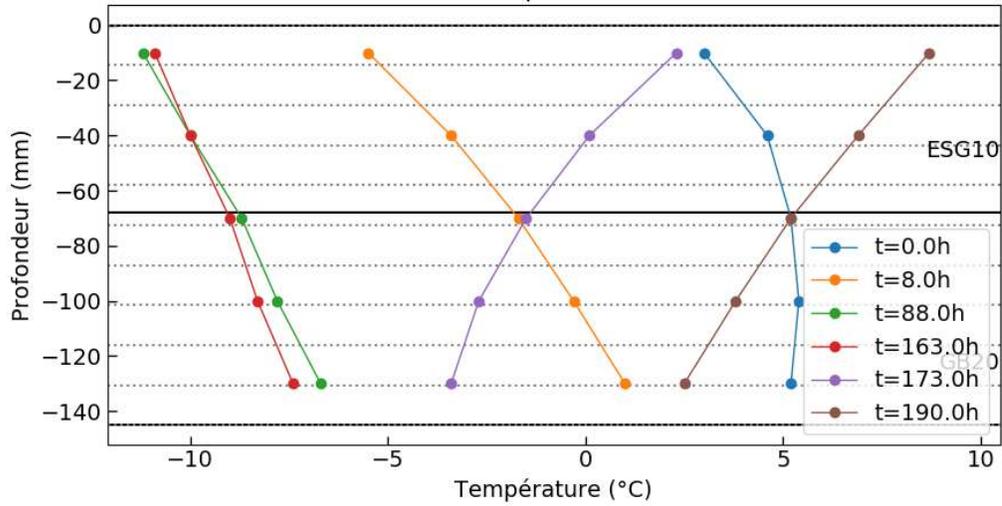


Figure 7: Profils de température mesurés dans les EB à différents instants du cycle 3 de MP B.

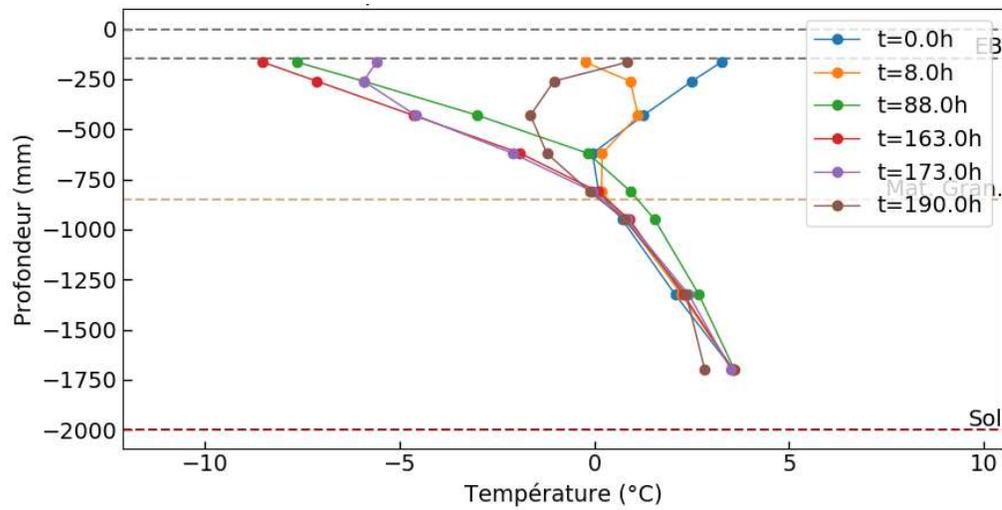


Figure 8: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 3 de MP B.

Cycle thermique #4

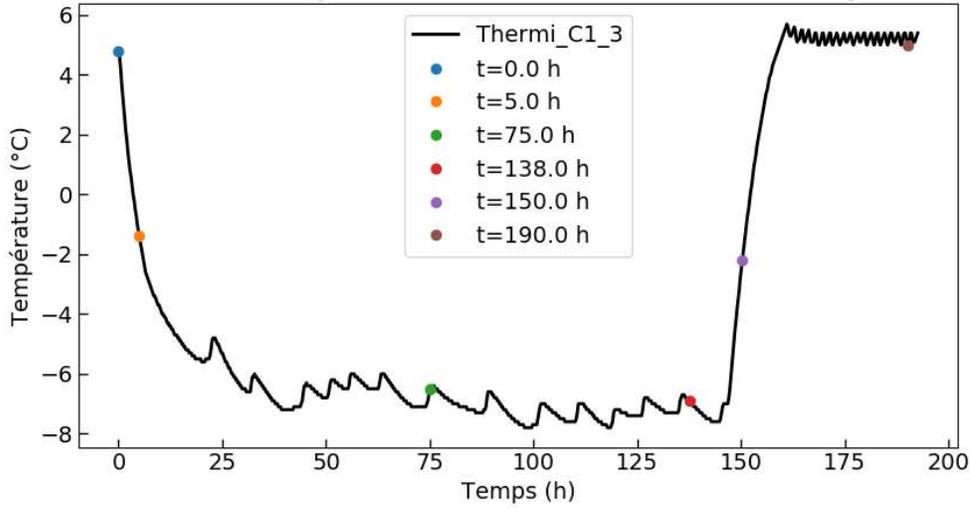


Figure 9: Évolution de la température d'interface ESG10/GB20 enregistrée par la thermistance C1_3 pendant le cycle 4 de MP B.

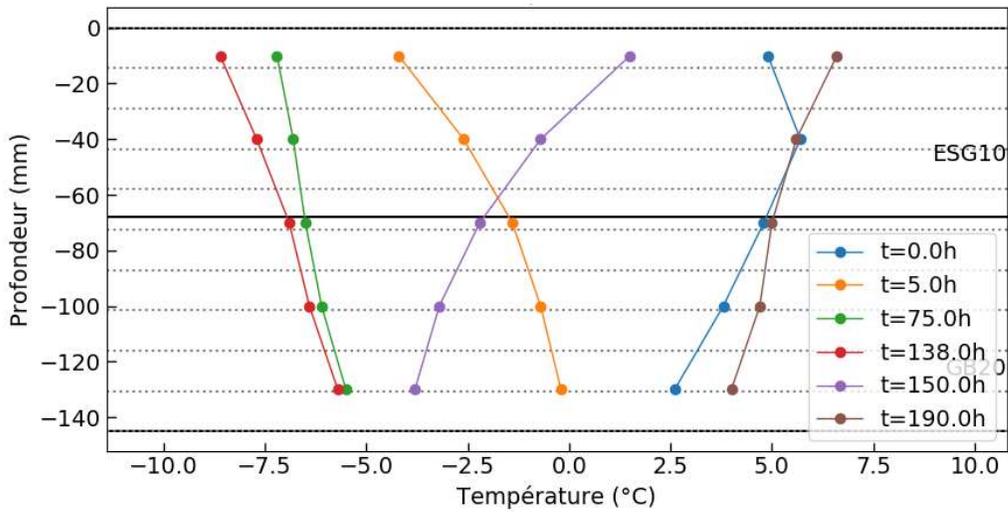


Figure 10: Profils de température mesurés dans les EB à différents instants du cycle 4 de MP B.

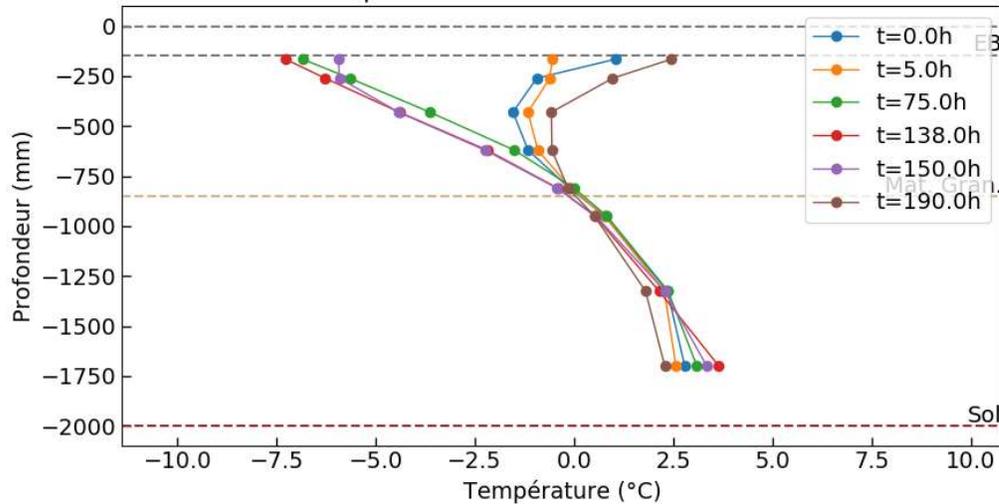


Figure 11: Profils de température mesurés dans les couches granulaires à différents instants du cycle 4 de l'essai B.

5.1.2 Déformation des couches bitumineuses sous cycle thermique (cycle #4, MP B)

Mesure du déflectomètre ancré

Pour commencer, observons que le déplacement vertical mesuré par le capteur ancré entre la surface de chaussée et le fond de la fosse ne peut être utilisé tel quel sous cycle thermique.

La Figure 12 montre la mesure enregistrée au cours du cycle #4 dont la valeur extrême atteint environ -4 mm. Ceci correspondrait à un coefficient de dilatation moyen d'environ $135 \mu def / ^\circ C$ pour l'ensemble de la structure soumise à une amplitude de température de $15^\circ C$ [de $+5$ à $-10^\circ C$], valeur bien au-delà des coefficients de dilatation des matériaux sollicités (enrobés, matériaux granulaires). Cette mesure est en fait affectée par les déformations thermiques propres de la barre d'ancrage et par la dérive thermique du capteur de déplacement lui-même. Cette mesure n'étant toutefois pas essentielle pour l'analyse de la structure sous chargement thermique, nous ne cherchons pas ici à approfondir l'exploitation de ce capteur. En revanche, celui-ci conserve tout son intérêt sous sollicitations rapides (exemple : passage de charge roulante) durant laquelle les variations de température sont négligeables.

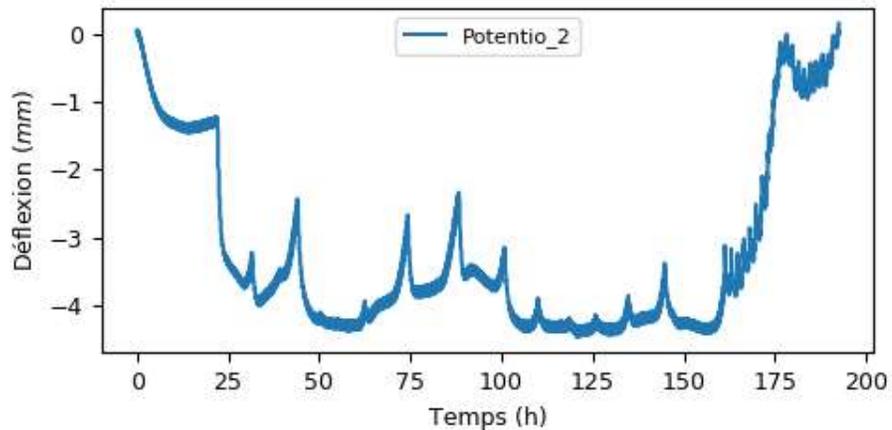


Figure 12: Évolution de la déflexion de surface pendant le cycle #4 de MP B .

Déformations longitudinale et transversale en bas de GB20

À la base de la couche de GB20, les déformations issues des jauges (après correction) dans les directions longitudinale et transversale sont globalement en contraction et les deux jauges dans chaque direction donnent des valeurs assez proches l'une de l'autre. En revanche, les valeurs mesurées dans la direction transversale sont nettement plus élevées que celles enregistrées dans la direction longitudinale, traduisant une anisotropie de la réponse structurelle attribuée plus loin à un effet de frettage de la base des couches bitumineuses distinct dans les deux directions et pour des sollicitations lentes de type thermique. L'effet de frettage prononcé dans la direction longitudinale, correspondant à la plus grande dimension de la fosse, limite considérablement les déformations de la structure dans cette direction et semble être plus représentatif d'une situation sur chaussée réelle que ce qui est observé dans la direction transversale.

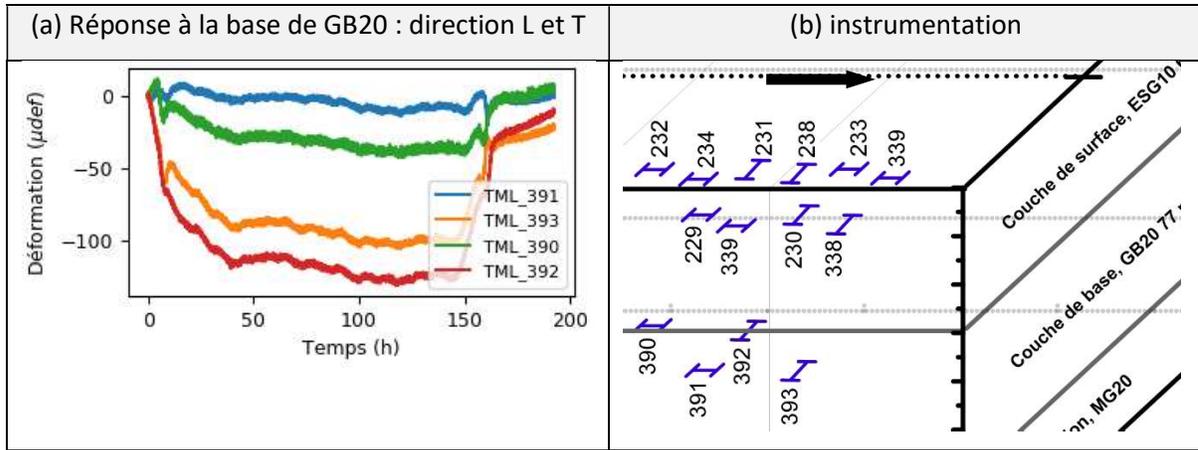


Figure 13: Déformations mesurées en bas de GB20 dans la direction longitudinale (jauges TML_390 et TML_391) et transversale (jauges TML_392 et TML_393) pendant le cycle #4 de MP B.

Déformations mesurées de part et d'autre de l'interface dans les directions longitudinale et transversale

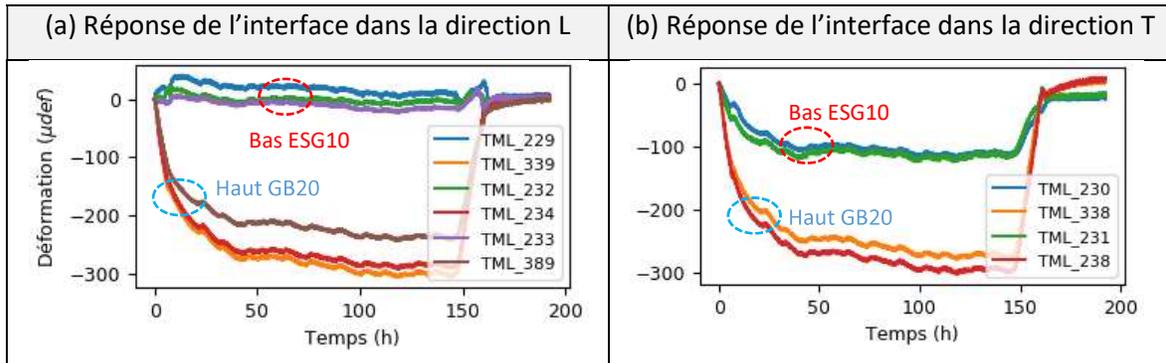


Figure 14: Réponse de l'interface dans les directions longitudinale et transversale pendant le cycle #4 de l'essai B.

Les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface et dans les directions longitudinale et transversale sont montrées sur les Figure 14-a et Figure 14-b respectivement.

Les déformations en sommet de GB20 apparaissent très élevées par rapport aux déformations en bas de ESG10 (cf. Figure 14) et semblent ni compatibles avec les autres mesures ni explicables dans le cadre d'une réponse d'ensemble de la structure au vu des diverses tentatives de modélisation effectuées. Ces déformations semblent plutôt résulter du mode de pose de ces jauges en sommet de GB20 qui ont été fixées en utilisant de la résine epoxy. Vis-à-vis de

sollicitations lentes, celle-ci peut alors se révéler rigide face aux enrobés⁴ et imposer sa propre déformation d'origine thermique à la jauge, comme pourrait le justifier par le coefficient de dilatation thermique d'une telle colle (supérieur a priori à $20 \mu def / ^\circ C$) et un delta de température de 15°C. Par conséquent, nous ne tiendrons pas compte dans la suite de la réponse de ces jauges sous sollicitations thermiques. Les différences observées entre les déformations de ces jauges et de celles situées en bas de ESG10 ne seront pas considérées révélatrices d'un type de comportement particulier de l'interface. Par contre, ces jauges seront bien exploitées pour les essais sous charge roulante pour lesquels les enrobés réimposent leur rigidité.

Concernant les déformations mesurées à la base de la couche de ESG10, on retrouve les tendances observées en bas de GB20 :

- Des déformations globalement en contraction
- Une forte différence entre les réponses des jauges longitudinales et transversales (anisotropie structurelle attribuée comme précédemment à un frettage en bas de GB20 distinct suivant les deux directions conduisant à des déformations longitudinales faibles)

5.2 Mégaphase B : modélisations numériques thermique et mécanique, comparaison avec les résultats d'essais

5.2.1 Calcul de la température dans les couches bitumineuses

Hypothèses et paramètres du modèle numérique

La modélisation de la diffusion thermique est réalisée par éléments finis pour la structure bitumineuse bicouche, d'épaisseur égale à 145 mm et de longueur arbitraire prise égale à 500 mm. Le problème est essentiellement 1D mais est résolu en 2D. Les calculs sont effectués à partir de l'environnement Freefem++.

⁴ Cet effet a déjà été observé en laboratoire sur des éprouvettes d'enrobé bitumineux instrumentées de jauges HBM collées à leur surface et soumises à des sollicitations lentes.

Les conditions aux limites en haut et bas du bicouche sont imposées égales aux températures mesurées par les thermistances situées à ces cotes. Les parois latérales sont prises à flux nul, le champ de température initial est pris homogène à 5°C (Figure 15).

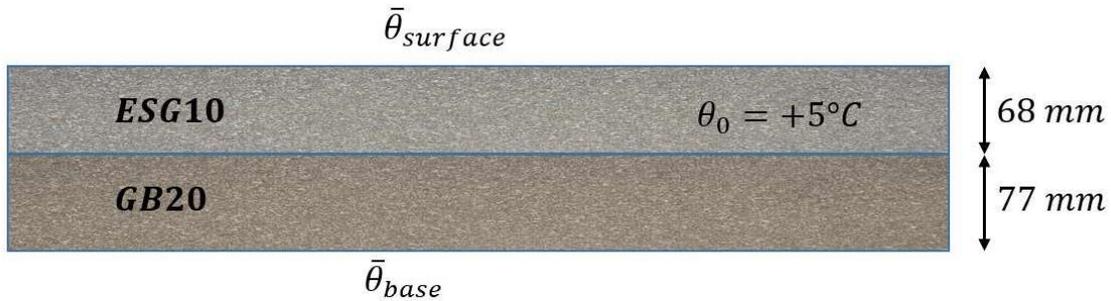


Figure 15: Structure bicouche modélisée.

Les propriétés thermiques des deux enrobés sont prises identiques étant donné leurs valeurs de porosité voisines (7% pour GB20 et 9% pour ESG10). En l'absence de mesures spécifiques, on retient les valeurs données dans le tableau ci-dessous.

Table 1: Propriétés thermiques de la structure bicouche.

Matériau	Conductivité thermique K_i ($W/K/m$)	Capacité calorifique spécifique C_i ($W.s/K/kg$)	Coefficient de dilatation/contraction thermique α ($m/m/K$)
ESG10	1.1	836	$2.5E - 5$
GB20	1.1	836	$2.5E - 5$

La capacité calorifique volumique est calculée par la formule :

$$C_v = C_{EB} \rho_{EB} \quad (7)$$

où ρ_{EB} est la masse volumique de l'enrobé, prise égale à 2350 kg/m^3 .

Résultats des phases de montée et descente en température du cycle #2 de l'essai B

Les Figure 16 et Figure 17 montrent les réponses expérimentales (marqueurs) et numériques (courbes continues) obtenues à différentes profondeurs pendant les phases de descente et montée en température. Un bon accord entre les valeurs mesurées et calculées est obtenu. L'outil numérique EF utilisé ici pourra donc être couplé avec les calculs mécaniques de la structure pour comparaison avec les déformations mesurées par jauge.

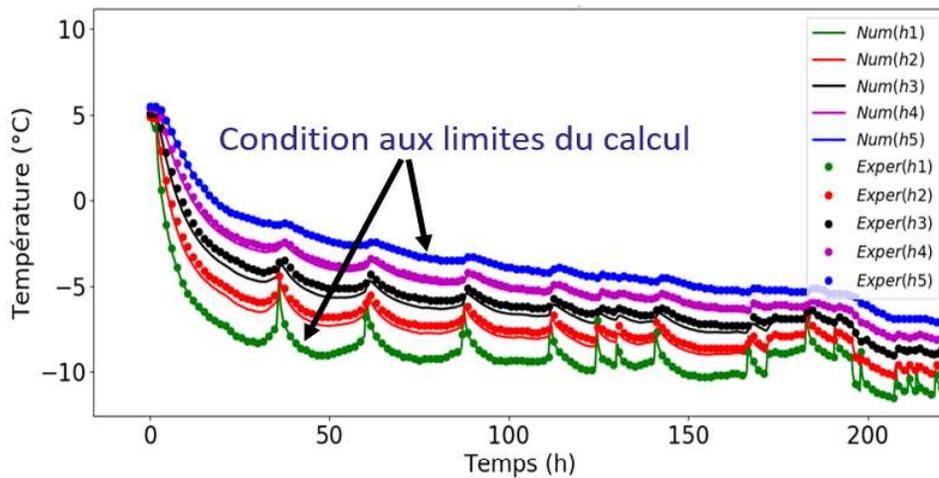


Figure 16: température mesurée par les thermistances dans les enrobés et comparaison avec les courbes numériques (phase de descente en température).

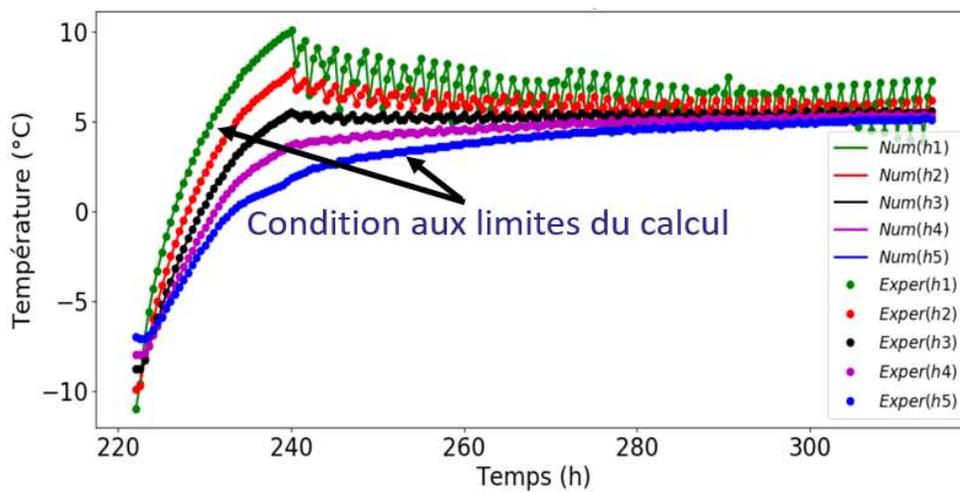


Figure 17: température mesurée par les thermistances dans les enrobés et comparaison avec les courbes numériques (phase de remontée en température).

5.2.2 Calcul des déformations d'origine thermique dans les couches bitumineuses (cycle #2, essai B)

Le but de cette section est de bien comprendre le comportement mécanique de la structure sèche sous sollicitation thermique pure. Pour ces conditions, nous allons montrer :

- d'une part qu'il est nécessaire d'introduire des conditions de freinage en bas de GB20 pour retrouver les mesures de jauge
- d'autre part que les mesures en haut de GB20 ne peuvent pas être représentatives du comportement de la chaussée.

Hypothèses de calcul

Par symétrie, un quart de la structure est modélisé. Les couches bitumineuses sont représentées par des éléments finis 3D et la rigidité verticale de l'ensemble des couches granulaires par des ressorts de Winkler ($\sigma_{zz} = -K_{sol}U_z$ avec $K_{sol} = 0.15 \text{ MPa/mm}$ d'après un rétro-calcul sur la déflexion). Les calculs sont faits en thermoélasticité avec les propriétés du Tableau 8. Le maillage utilisé est présenté en vue du dessus sur la Figure 18. Il est pris plus fin autour de la zone de calcul des déformations J symbolisée par la jauge sur cette figure.

Tableau 8 : Paramètres de modélisation pour les couches de ESG10 et GB20.

	e (mm)	E (MPa)	ν
ESG10	68	1700	0.35
GB20	77	1900	0.35

Les conditions de contact horizontales entre GB20/MG20 sont modélisées par des ressorts de « Winkler horizontaux » de rigidité K_f conduisant aux relations suivantes entre contraintes de cisaillement et déplacements :

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = -K_f U_x \\ \sigma_{yz} = -K_f U_y \end{cases} \quad (8)$$

La valeur de K_f va permettre de rendre compte de façon approximative de conditions de frottage qu'il serait plus réaliste de modéliser par une loi de frottement de Coulomb mais qui nécessiterait la résolution d'un problème non linéaire. Deux cas sont envisagés ci-après : le cas sans frottage avec $K_f = 0$ et le cas avec frottage pour $K_f = 1.32 \text{ MPa/mm}$. La valeur $K_f = \infty$ est écartée. Elle correspondrait à un blocage complet du bas de GB20 et donc à des déformations horizontales nulles non compatibles avec les observations (notamment dans le sens transversal).

Le chargement résulte classiquement pour ces calculs du terme de contraintes initiales résultant de la loi de comportement thermoélastique des matériaux et du champ de température calculé à chaque instant par le module de calcul EF thermique précédent.

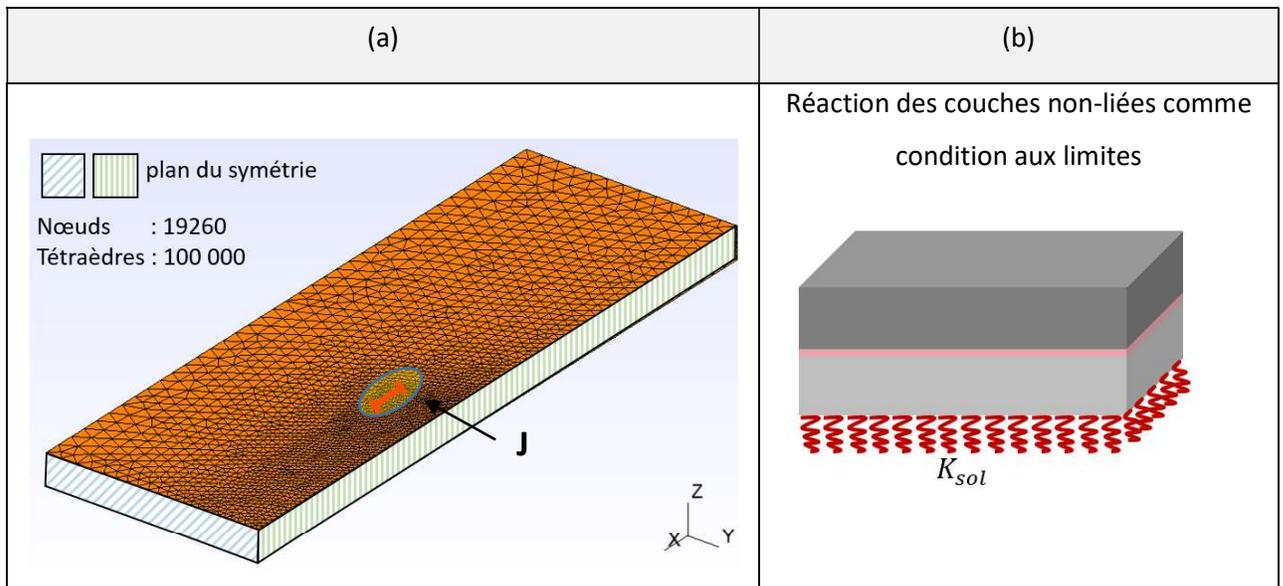


Figure 18: Maillage de la structure, position des capteurs numériques et conditions aux limites de calcul.

Calcul sans frottage ($K_f = 0$)

Dans ce cas, le bicouche bitumineux est supposé simplement reposer sur la couche de fondation sans effort de frottement.

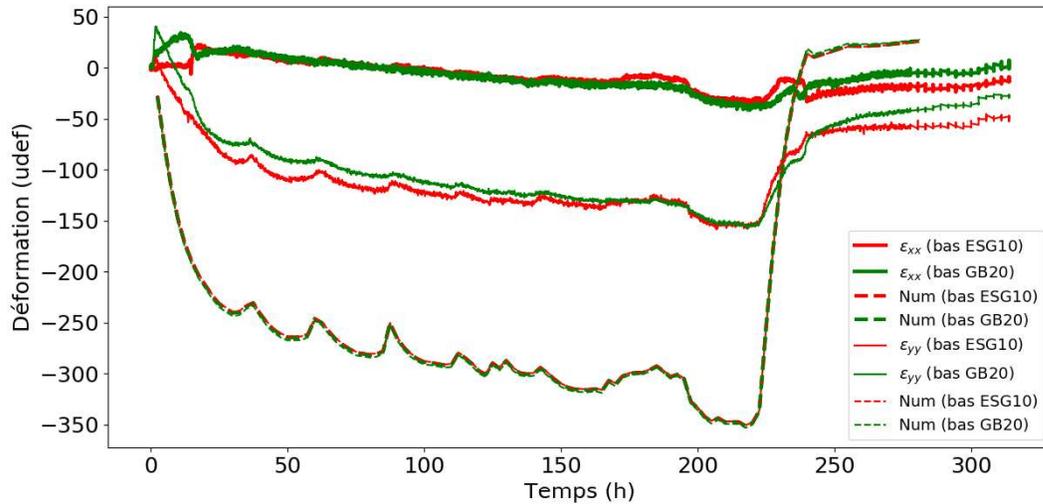


Figure 19: Évolution des déformation mesurée et calculée sans condition de frettage (glissement parfait), à la base de la couche de ESG10 et GB20 dans les directions longitudinale et transversale. Nota : toutes les courbes numériques (en pointillés) sont ici confondues.

Les résultats de la Figure 19 montrent que sous cette hypothèse les déformations calculées dans la zone J ont même valeur en bas de GB20 et de ESG10 ne montrant donc pas de flexion d'ensemble malgré le gradient thermique. Par contre, elles sont aussi identiques dans les directions longitudinale et transversale, contrairement aux mesures, et d'amplitude largement supérieures à celles mesurées. L'anisotropie structurelle de la réponse n'est donc pas bien reproduite.

Avec hypothèse de frettage ($K_f = 1.32 \text{ MPa/mm}$)

La Figure 20 montre les déformations calculées dans la zone J en présence de ressorts horizontaux de raideur $K_f = 1.32 \text{ MPa/mm}$ (obtenue après calage) pour simuler des conditions frettage en bas de GB20. Comme pour l'essai, le modèle ne fait pas apparaître de flexion d'ensemble du bicouche et reproduit maintenant une anisotropie structurelle marquée. Les déformations obtenues dans la direction longitudinale sont très faibles avec un effet de frettage quelque peu surestimé par rapport à l'essai. Les déformations transversales affichent des amplitudes de l'ordre de $150 \mu\text{def}$ au maximum, coïncidant ainsi assez bien avec les valeurs mesurées. Cette modélisation est donc plus satisfaisante que la précédente. Nous conserverons

par la suite les mêmes hypothèses de calcul pour simuler la réponse de la structure en condition humide sous cycles de gel/dégel.

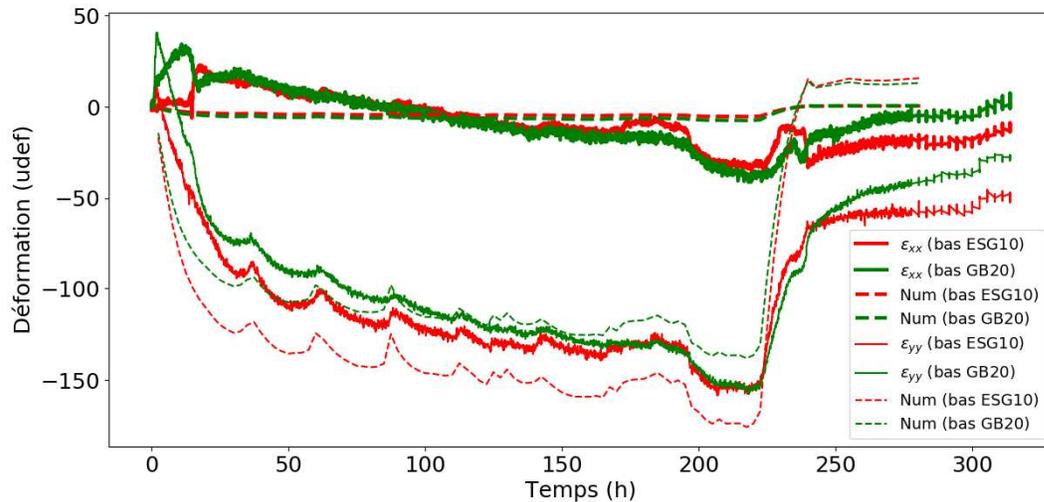


Figure 20: Évolution des déformations mesurée et calculée à la base de la couche de ESG10 et de GB20 dans les directions longitudinale et transversale avec condition de frettage.

Cas de la réponse des jauges en sommet de GB20

Nous avons précédemment écarté les valeurs expérimentales des jauges en sommet de GB20 pour les sollicitations thermiques apparaissant comme non compatibles avec les autres mesures. La Figure 21 compare à cet effet les valeurs livrées par le modèle pour le haut de GB20 avec les valeurs d'essai. La simulation prévoit alors une anisotropie du comportement du haut de GB20 avec des valeurs proches de celles déjà calculées et mesurées pour les autres jauges dans les directions longitudinale et transversale. Ceci semble bien confirmer un biais de mesure des déformations thermiques pour les jauges placées en haut de GB20, sans doute lié à leur mode de pose.

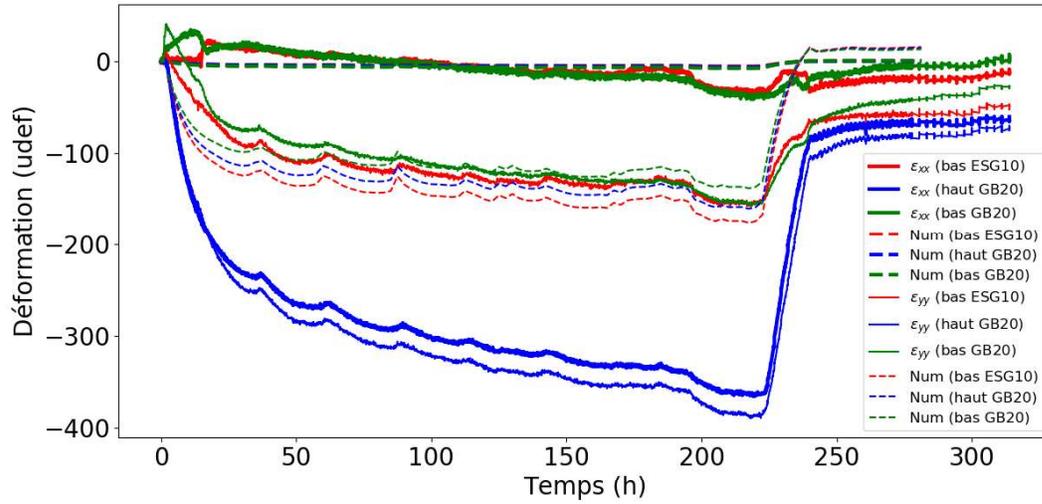


Figure 21: Évolution des déformations mesurée et calculée dans le bicouche bitumineux dans les directions longitudinale et transversale avec condition de frettage.

6 Mégaphase C : Chargement mécanique en conditions sèches pour $T_{interface}=20^{\circ}C$

La mégaphase C du protocole d'essai est effectuée à température d'interface constante ($T = 20^{\circ}C$). Cet essai est pris dans la suite de ce rapport comme essai de référence sous chargement mécanique pour comparer la réponse de la structure sous différentes autres conditions d'essais : température d'interface et niveau de chargement.

À titre d'information, les profils de température verticaux régnant dans la structure au cours de la séquence d'essai C7 (charge de 40 kN) sont précisés sur la Figure 22. La température dans les enrobés est peu variable en z compte tenu de leur relativement faible épaisseur et considérée homogène dans les simulations sous charge roulante, prise égale à $20^{\circ}C$ pour C7. Les températures dans les couches granulaires varient davantage mais restent positives. Dans ces conditions, leur module d'Young est supposé indépendant de la température dans les modèles. Il est à noter ici un léger saut de température à l'interface GB20/MG20, provenant sans doute du fait que les températures dans ces deux couches sont mesurées à partir de chapelets de thermistances positionnés à des distances différentes des bords de fosse.

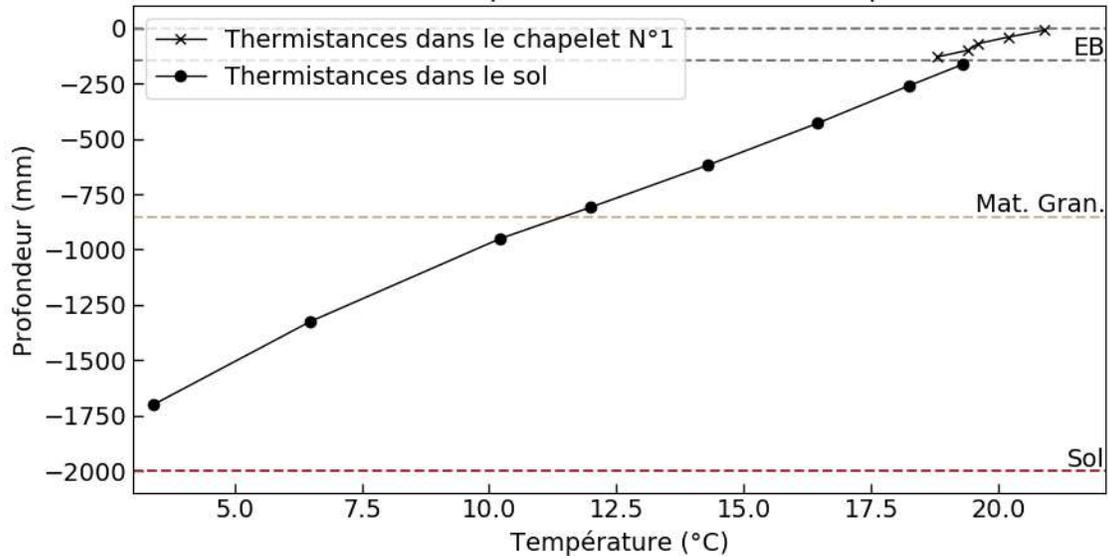


Figure 22: Profil de température vertical dans la structure de chaussée pendant l'essai C7 (températures issues de deux chapelets de thermistances différents).

6.1 Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai C7)

Cette partie porte sur l'analyse des signaux de déformation recueillis par les capteurs TML positionnés dans les couches d'enrobé. Les signaux expérimentaux sont comparés aux signaux calculés avec ViscoRoute© 2.0 et pour les valeurs de paramètres du modèle viscoélastique de Huet données à la section 4.

À noter que tous les signaux présentés dans ce rapport correspondent à un passage de charge de la gauche vers la droite (9 km/h).

Mesures de Déflexion

La Figure 23 montre la déflexion de surface mesurée par le déflectomètre ancré (potentiomètre « potentio_2 ») au passage de la charge du simulateur. Le signal montre une bonne répétabilité. Une valeur maximale de 0.27 mm est enregistrée au cours des 15 passages de l'essai C7.

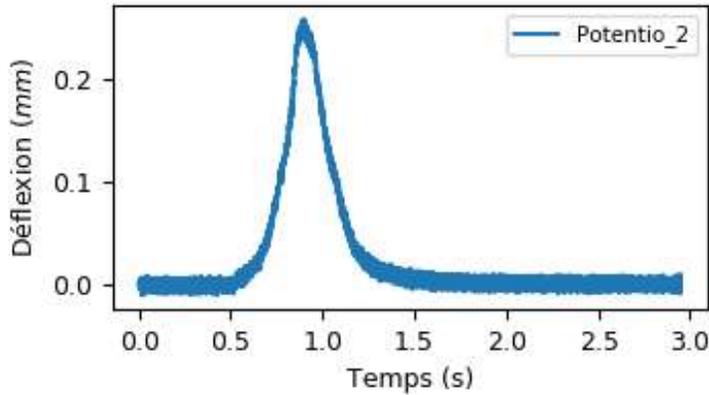


Figure 23: Déflexion de surface pendant le passage #1 de l'essai C7

Mesures de déformation en bas de GB20

La Figure 24 présente les déformations longitudinale et transversale mesurées en bas de GB20 au droit des passages de roue. La forme des signaux est typique des déformations en base de couche structurante avec des extrema en extension de valeur plus importante ici dans la direction longitudinale. On observe une relativement bonne reproductibilité des déformations mesurées.

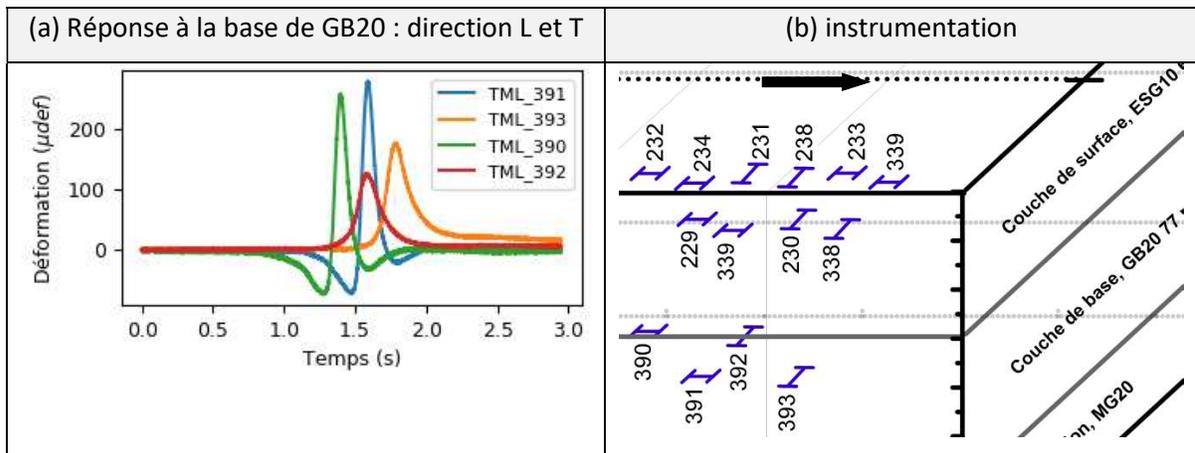


Figure 24: Déformations mesurées à la base de GB20 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai C7.

Mesures des déformations de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20

La Figure 25 montre les déformations longitudinale et transversale enregistrées à la base de la couche de ESG10.

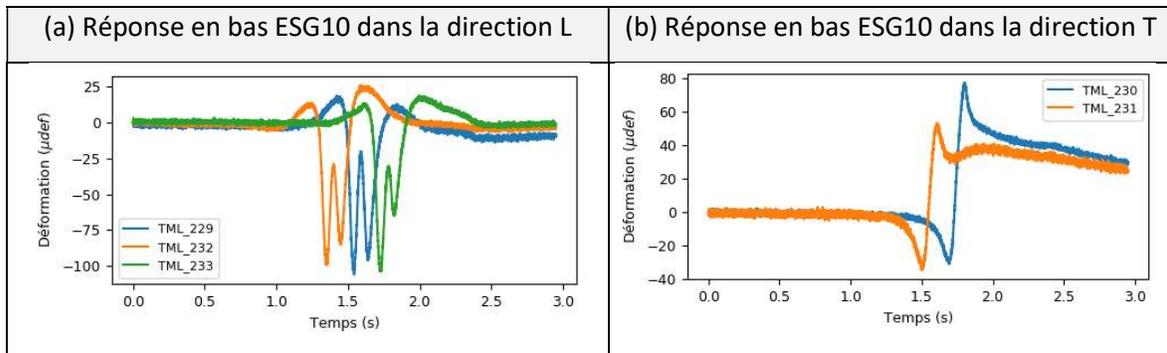


Figure 25: Déformations mesurées à la base de ESG10 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai C7.

On constate une bonne répétabilité des mesures. Les allures des signaux dans les deux directions sont fortement différentes. Les signaux longitudinaux présentent des extrema en contraction. On constate également qu'ils ont une forme en M qui ne peut évidemment pas être expliquée par le passage de deux roues successives. Les signaux transversaux montrent des extrema en extension qui reviennent lentement à zéro après le passage de la charge.

Les Figure 26 et Figure 27 présentent les déformations en haut de GB20 sur la base des figures précédentes. Ces déformations sont de faible amplitude et fortement différentes de celles en bas de ESG10. Ces mesures mettent donc en évidence un fort gradient de déformation horizontale à l'interface ESG10/GB20 ne pouvant être compatible avec un comportement « parfaitement collé » de celle-ci (au sens des modélisations de chaussée multicouche habituelles). La modélisation de l'interface par une couche mince viscoélastique va nous permettre de reproduire ces discontinuités de déformation entre couches d'enrobé.

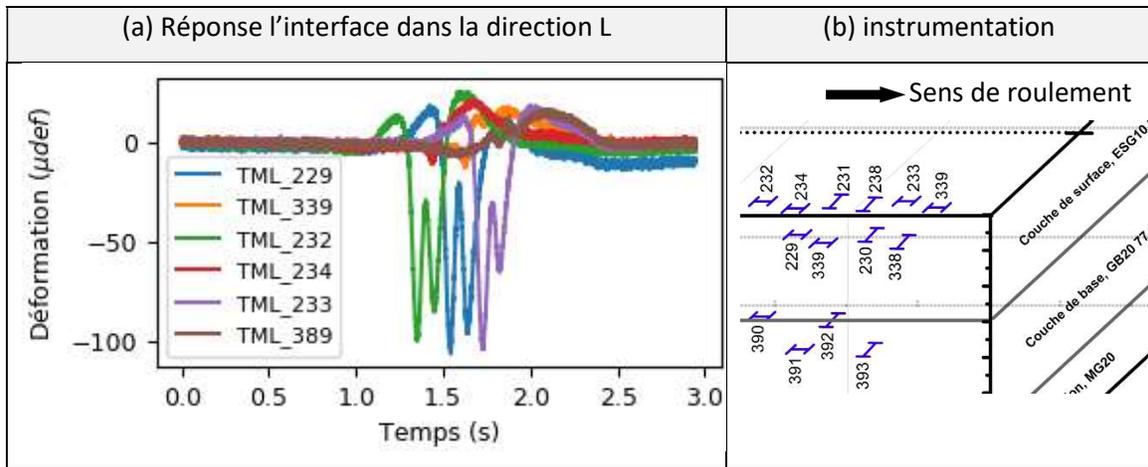


Figure 26 : Déformations longitudinales de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20.

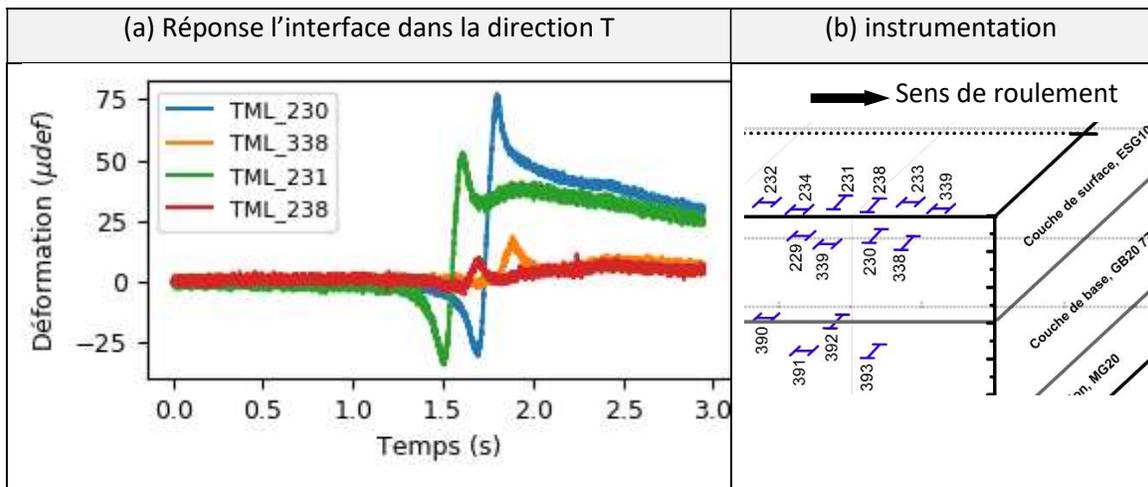


Figure 27 : Déformations transversales de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20.

6.2 Comparaison entre mesures et modélisations mécaniques sous charge roulante (phase d'essai C7)

6.2.1 Définition de la structure et des propriétés mécaniques des couches

La Figure 28 rassemble les données géométriques et mécaniques de la structure modélisée par ViscoRoute© 2.0. Elle comporte 6 couches reposant sur une couche semi-infinie et « rigide » représentant le fond de la fosse. Les couches 1 et 3 correspondent à l'ESG10 et au GB20 et les couches 4, 5 et 6 au MG20, MG112 et au sol. La couche 2 d'épaisseur 0.5 mm va permettre

de rendre compte d'une interface à comportement non strictement « collé » entre les deux couches d'enrobé.

	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Module E0 (MPa)	T (°C)	k (loi H-S)	h (loi H-S)	delta (loi H-S)	A0	A1	A2
1	0.068	0.068	25000.00000	0.350	3.90000	20.000	0.166	0.494	2.740	-1.737	-0.356	0.001780
2	0.068	0.000	900.00000	0.500	0.00000	20.000	0.250	0.780	3.790	-1.500	-0.380	0.002310
3	0.145	0.077	25000.00000	0.350	4.30000	20.000	0.164	0.491	2.424	-1.313	-0.359	0.001970
4	0.379	0.234	190.00000	0.250	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
5	0.853	0.474	160.00000	0.250	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
6	1.697	0.844	136.00000	0.250	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
7		infini	200000.00000	0.350	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Figure 28 : Propriétés mécaniques des couches de la structure.

Les propriétés viscoélastiques des couches de ESG10 et GB20 sont issues de la Section 4.1 et traduites à travers le modèle de Huet.

La température dans les couches bitumineuses est fixée ici égale à 20°C. Les propriétés de la couche 2 seront prises élastiques ou viscoélastiques (valeurs de la Figure 28) en fonction des hypothèses retenues au niveau de l'interface ESG10/GB20. Les modules du sol et des couches non bitumineuses (Section 4.2) sont obtenus par un rétro-calcul des mesures FWD (BAKFAA) effectuées sur la structure sèche.

Il faut noter que les calculs ViscoRoute© 2.0 sont effectués dans le repère de la charge roulante (X, Y, Z). L'origine de ce repère est située en surface de chaussée. L'axe Z est dirigé vers le bas, l'axe X dans le sens de roulement de la charge et l'axe Y est transversal à la chaussée.

6.2.2 Modélisation du chargement

Les données de chargement associées au simulateur de trafic de l'Université Laval, sont présentées sur la figure suivante :

Vitesse de charge (m/s)		2.5		Nombre de charges		2		
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Type de charge	a (m)	b (m)	x (m)	y (m)
1	0.000	0.000	20000.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	0.000
2	0.000	0.000	20000.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	0.375

Figure 29: Chargement appliqué sur la structure de chaussée - simulation du jumelage de l'accélérateur de trafic.

Les variables a et b sont les demi-axes des ellipses représentant les surfaces de contact des roues du simulateur, assimilées ici à 2 disques de rayon 0.125 m. Les valeurs de Fz représentent les forces appliquées sur chacune des roues (20 kN par roue). Les valeurs X et Y (notées x et y dans la Figure 29) sont les coordonnées des centres d'empreintes dans le repère du chargement roulant. L'axe X est supposé situé ici sous la roue droite de la charge.

Afin de permettre une comparaison entre les résultats de calcul ViscoRoute© 2.0 et les mesures des jauges au passage d'une charge, nous convertissons l'abscisse X des résultats du logiciel en variable temporelle (temps t de la mesure) avec la formule suivante :

$$t = -X/V + t_{jauge,max} \quad (9)$$

où V est la vitesse de la charge prise égale à 2.5 m/s (9 Km/h) dans le cas présent. $t_{jauge,max}$ est le temps correspondant à la valeur extrême du signal mesuré. Nous supposons que celui-ci intervient au moment où la charge du simulateur est au droit de la jauge.

Dans la suite, la comparaison entre calculs et mesures est faite pour le passage #5 du simulateur et pour les champs suivants : déflexion, déformations longitudinales et transversales en bas de GB20, en bas de ESG10 et en haut de GB20.

6.2.3 Résultats de la comparaison essai / modèle avec interface viscoélastique

Les résultats de calcul présentés dans cette section sont obtenus pour l'interface viscoélastique entre ESG10 et GB20 avec les paramètres de la Figure 28.

Déflexion

La Figure 30 montre le bon accord obtenu entre les déflexions mesurée et calculée. Notamment, les valeurs maximales concordent bien. Néanmoins, la déflexion obtenue par Viscoroute est très légèrement plus longue, ce qui peut être attribuable à de petits écarts entre le modèle et les conditions réelles.

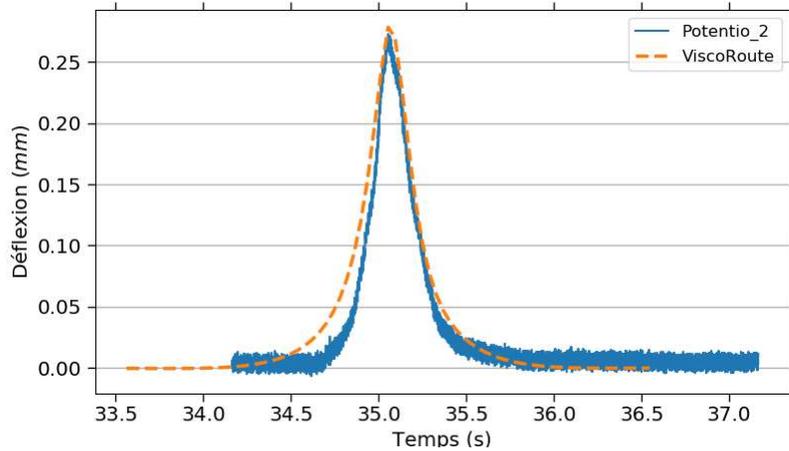


Figure 30: Comparaison entre les déflexions de surface mesurée (potentiomètre 2) et calculée lors du passage #5 de l'essai C7.

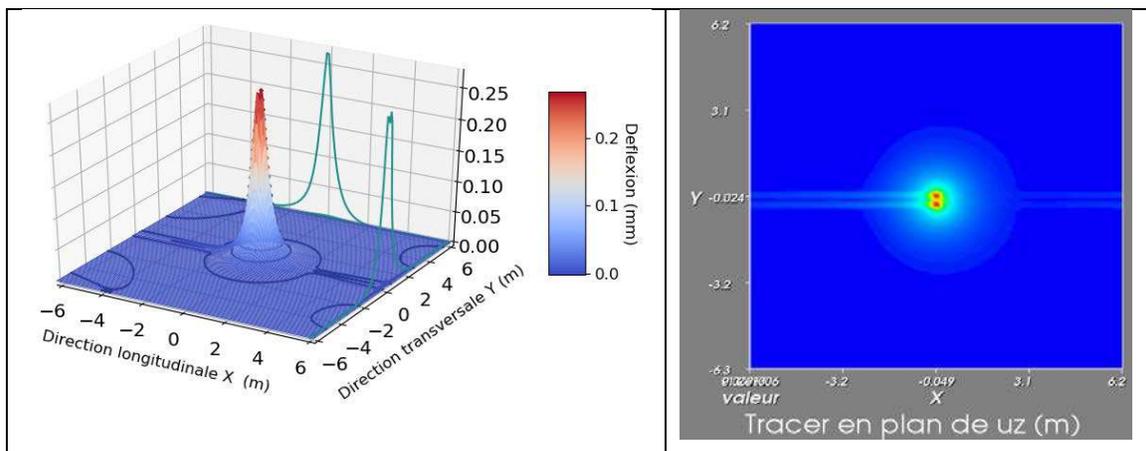


Figure 31: Représentation 2D et 3D de la déflexion lors du passage des roues.

Déformations longitudinales et transversales

La Figure 32 montre la comparaison essai/modèle pour les déformations longitudinale et transversale en bas de GB20. Un bon accord d'ensemble est obtenu avec un pic de déformation plus élevé pour le modèle dans la direction longitudinale.

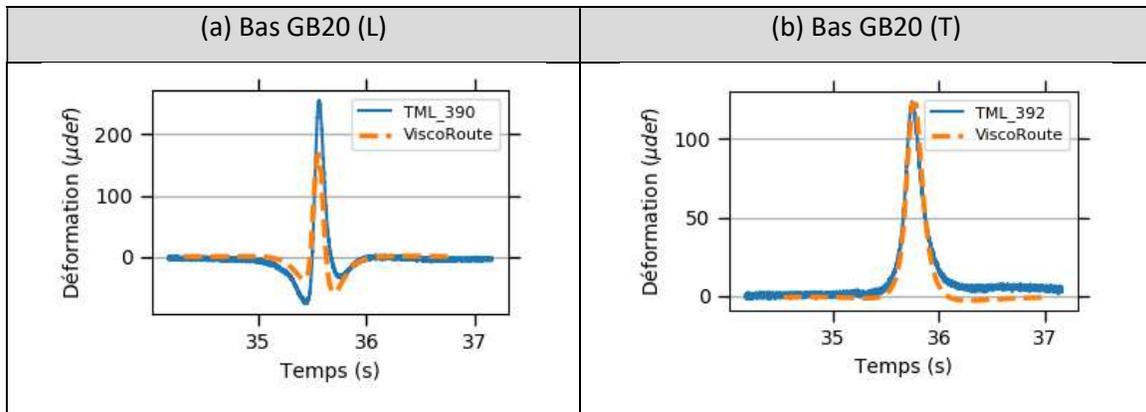


Figure 32: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées à la base de GB20 et dans les directions longitudinale et transversale (essai C7).

La Figure 33 montre la comparaison essai/modèle pour les déformations de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20. L'accord entre les courbes est relativement satisfaisant du moins en termes d'amplitude de déformation de chacune des jauges et permet de rendre compte de la discontinuité des déformations au niveau de l'interface observée expérimentalement.

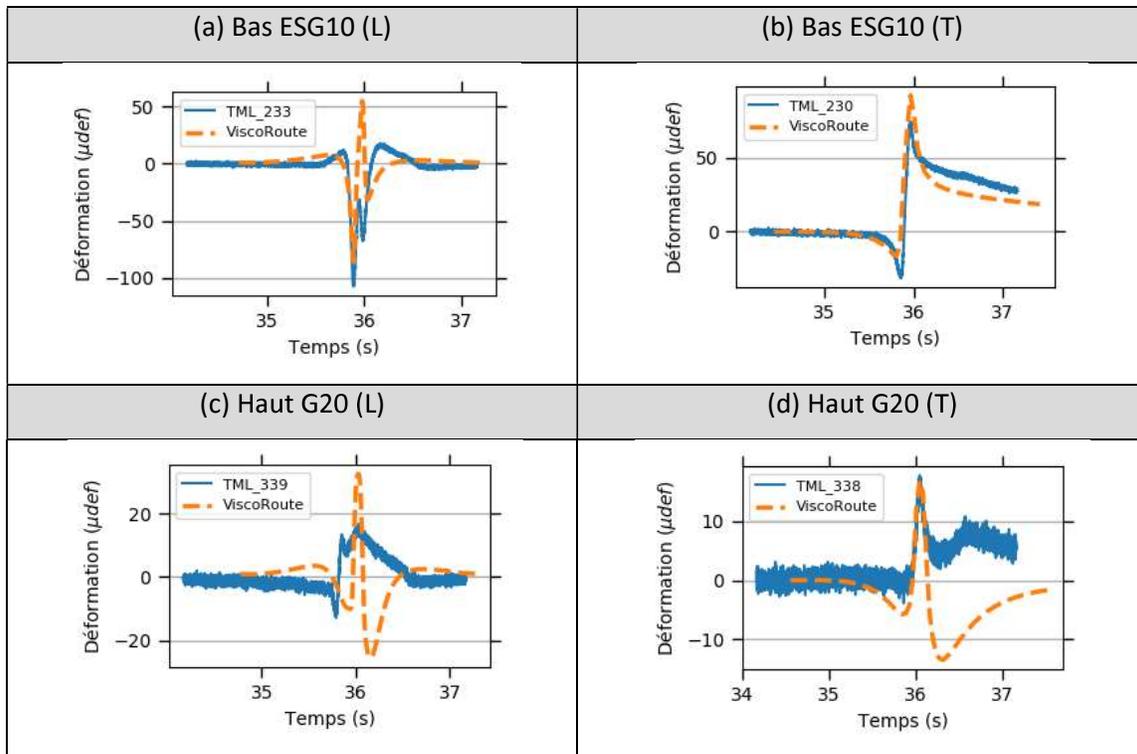


Figure 33: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai C7). NB : ces courbes sont tracées suivant des échelles différentes en ordonnée; les écarts sur les petites valeurs de déformations sont à relativiser.

Une amélioration de la forme des courbes numériques pourrait être obtenue en rendant le comportement d'interface « visqueux-frottant », de manière à faire dépendre la loi d'interface viscoélastique en fonction de la contrainte normale jusqu'à bloquer les discontinuités de déplacements horizontaux sous la charge (voir Figure 34 et Figure 35). Ce comportement de « type loi de Coulomb » a déjà pu être constaté concernant le fonctionnement d'une interface entre couches d'enrobés⁵. Dans le cas présent, ce comportement « visqueux-frottant » peut être supposé comme régissant le contact ESG10/GB20 tout au long du parcours de la charge et ne pas être lié localement à la présence de jauges. Comme il est montré à la Figure 34, le résultat de cette construction (dans l'encadré) est obtenu par juxtaposition de portions des courbes. Le fonctionnement en mode « tout collé » est considéré pour des positions de centre de charge situées dans une zone d'environ ± 15 cm de part et d'autre du capteur correspondant aux valeurs

⁵ Chupin, Olivier, Piau, J. M., Chabot, A., Nasser, H., Nguyen, M. L., & Lefevre, Y. (2020). Simulation of damage scenarios in a bituminous pavement tested under FABAC ALT using M4-5n. *Lecture Notes in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_40

élevées de contrainte verticale, soit lorsque l’empreinte du pneu est au voisinage du capteur. Cette réponse passant alternativement aux modes visqueux-collé-visqueux en fonction de la position de la charge au capteur permet d’éliminer le pic d’extension (valeur positive de déformation) du cas purement visqueux et d’être plus près de la mesure expérimentale. Il doit être noté qu’un calcul rigoureux nécessiterait de formuler la loi de contact en fonction de la contrainte normale et d’intégrer celle-ci dans l’algorithme de résolution viscoélastique. Il conviendrait aussi de tenir compte de la réponse dans les autres directions et en haut de GB20.

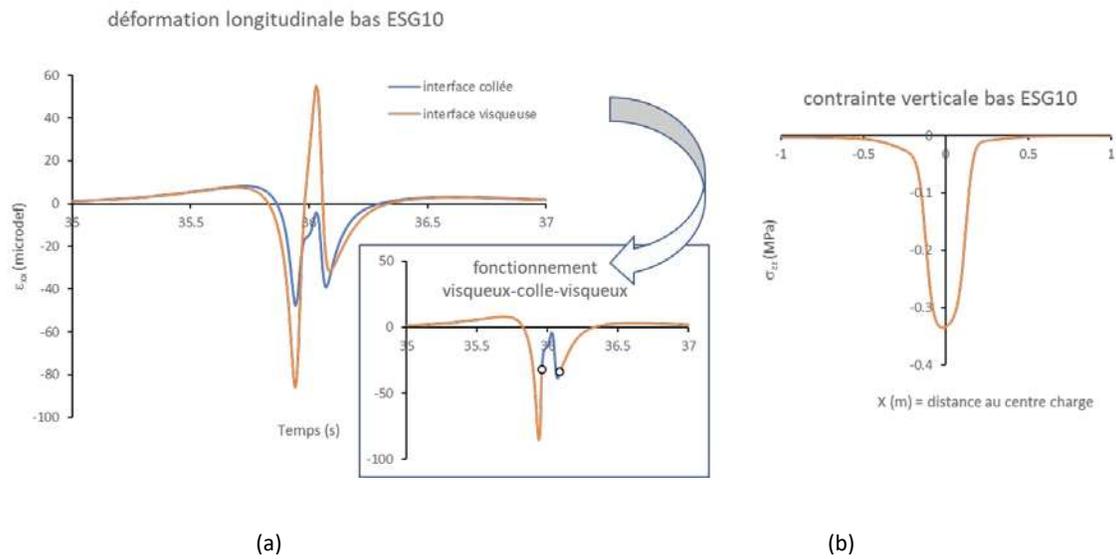


Figure 34 : (a) construction approchée de la réponse d’une interface « viscoélastique-frottante » à partir des cas visqueux (courbe orange) et collé (courbe bleue) pour la jauge 233.

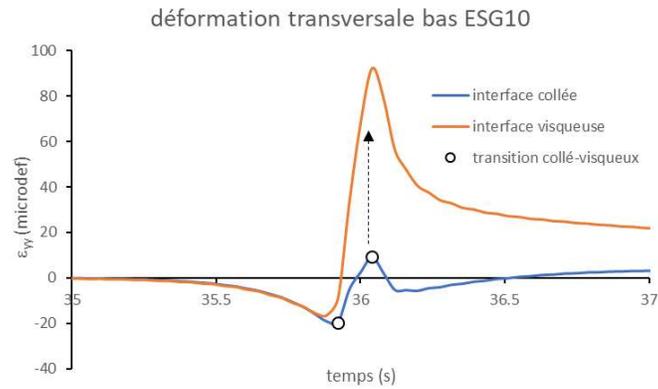


Figure 35 : réponses du modèle en déformation transversale (bas ESG10) pour des interfaces visqueuse et collée et points de transition pour la construction d'une interface « viscoélastique-frottante ». Ici le résultat d'une telle construction reste voisin du cas visqueux qui correspondait bien à la mesure de la jauge TML-230.

Au final, on peut considérer que le jeu de données de la Figure 28 traduit bien le comportement de la structure d'essai à l'état sec et pour une température dans les couches d'enrobé de l'ordre de 20°C.

7 Mégaphase D : Chargement mécanique en conditions sèches pour $T_{interface}=5^{\circ}C$

La mégaphase D du protocole d'essai est effectuée à température d'interface constante $T = 5^{\circ}C$. Pendant cette phase, trois niveaux de chargement ont été appliqués sur la surface de la chaussée : $Q=40, 50$ et 65 KN correspondant aux essais D13, D14 et D15.

Comme précédemment, nous présentons d'abord les signaux des capteurs de température, de déflexion et de déformation sous charge roulante. Ceux-ci sont ensuite comparés à des modélisations ViscoRoute© 2.0.

7.1 Profils de température mesurés par les thermistances

Les figures ci-après montrent les profils de température mesurés dans les couches d'enrobé et les couches granulaires au début des essais mécaniques D13 et D14. Les profils obtenus pendant l'essai D15 sont similaires à ceux mesurés pendant l'essai D14.

Pendant ces essais, on remarque que la température des couches bitumineuses est proche des $5^{\circ}C$ visés pour l'interface ESG10/GB20.

Dans les couches granulaires, le profil vertical de température est non monotone du fait des conditions initiales, des conditions limites en bas de fosse et de l'inertie thermique des matériaux. Les températures sont par contre positives sur toute la hauteur et similaires pour D13 et D14. On peut les supposer sans influence sur le comportement mécanique de ces matériaux.

Essai D13 (Q=40KN)

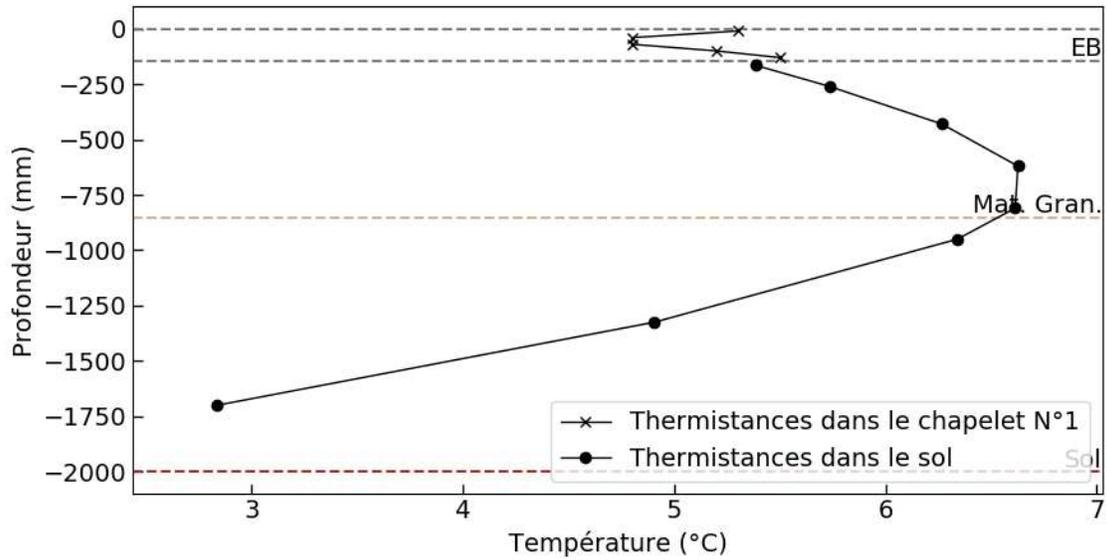


Figure 36: Profil vertical de température dans la structure de chaussée pendant la phase d'essai D13.

Essai D14 (Q=50KN)

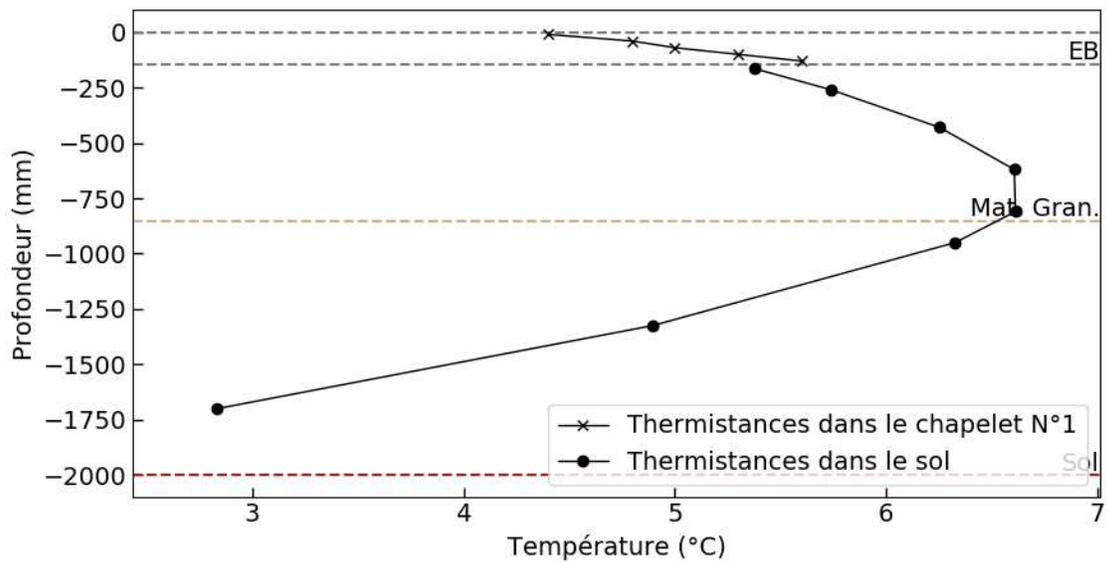


Figure 37: Profil vertical de température dans la structure de chaussée pendant la phase d'essai D14.

7.2 Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai D13, Q=40 kN)

La Figure 38 montre la déflexion du capteur ancré #2 au passage du demi-essieu. La déflexion maximale est de 0.22 mm, légèrement plus petite que celle enregistrée pendant l'essai C7 (valeur de 0.26 mm à 20°C). Cette différence est due à la sensibilité thermique du comportement des couches bitumineuses (5 vs 20°C).

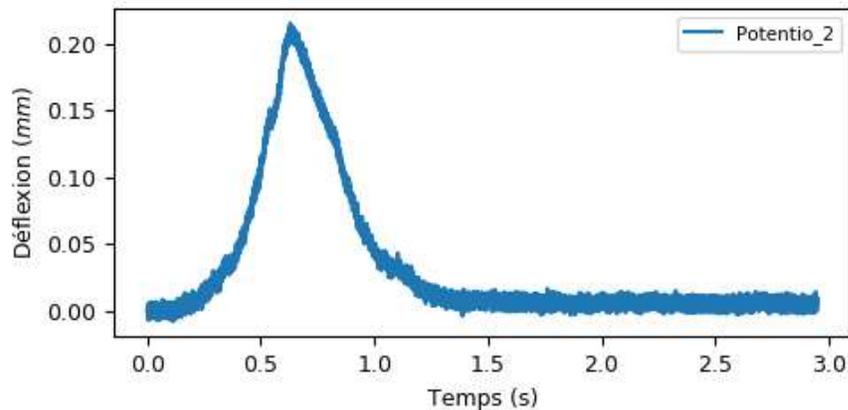


Figure 38: déflexion de surface mesurée pendant le premier passage de charge de l'essai D13.

Déformations longitudinale et transversale en bas de GB20

La Figure 39 montre des déformations qualitativement semblables à celles de l'essai C7 (Figure 24) mais avec des amplitudes environ deux fois plus petites, en raison de la température plus froide.

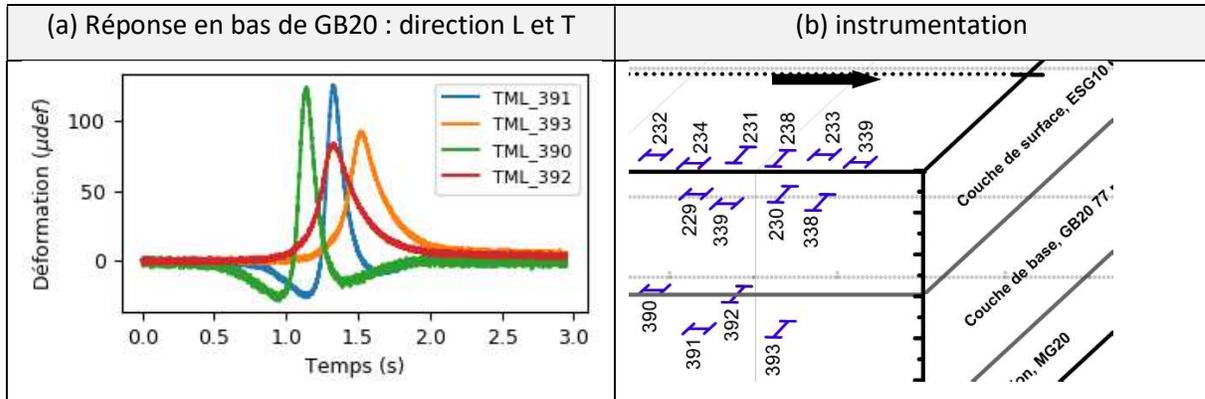


Figure 39 : Déformations mesurées en bas de GB20 dans les directions longitudinale et transversale sous le premier passage de l'essai D13.

Déformations longitudinale et transversale de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20

Les réponses des jauges situées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 sont illustrées sur les figures suivantes.

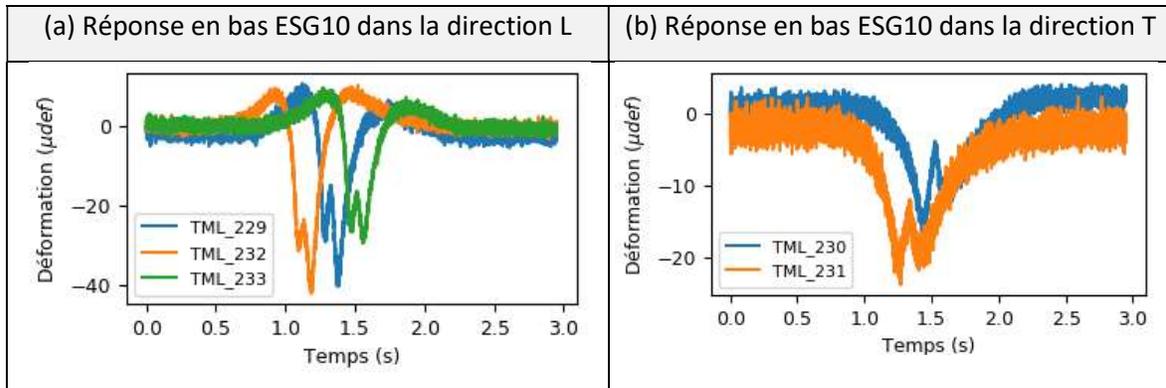


Figure 40: Déformations mesurées à la base de GB20 dans la direction longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai D13.

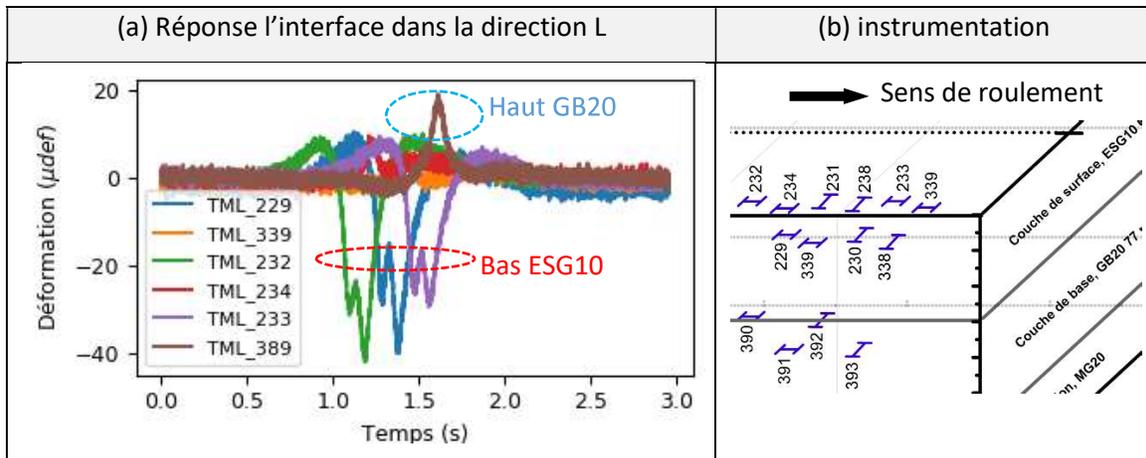


Figure 41: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction longitudinale pendant le passage #1 de l'essai D13. NB : l'effet double pics de faible amplitude vu sur les courbes en bas de ESG10 se produit sous le passage d'une seule roue (gauche ou droite) et n'est pas lié à un « effet tandem ».

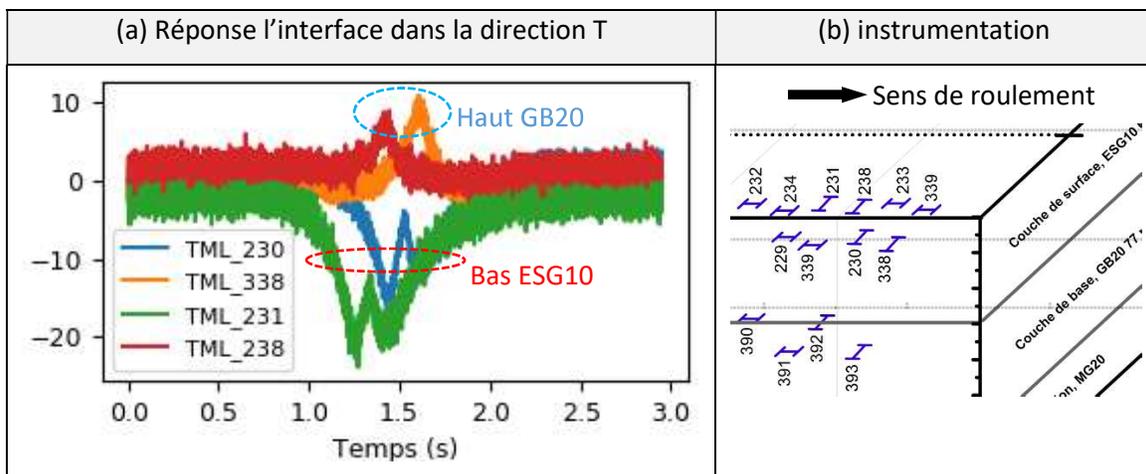


Figure 42: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction transversale pendant le passage #1 de l'essai D13.

Dans la direction longitudinale (Figure 40-a et Figure 41-a), on voit une réponse similaire à celle mesurée pendant la mégaphase C mais avec des amplitudes réduites de moitié environ. Dans la direction transversale en bas de ESG10, on remarque une différence de forme avec les signaux de la mégaphase C. Le pic d'extension a disparu et la déformation revient à zéro plus rapidement après le passage de la charge.

Effet du niveau de charge

Les figures suivantes présentent les valeurs extrémales (pics d'extension ou de contraction les plus significatifs) mesurées aux trois cotes (bas GB20, bas ESG10 et haut GB20) pour les trois niveaux de chargement de la mégaphase D. Les valeurs affichées sont des moyennes sur les différentes jauges (L) ou (T) situées à la même cote ; elles sont accompagnées de barres d'erreur correspondant à plus ou moins l'écart type. Celles-ci sont relativement petites indiquant une bonne répétabilité des jauges placées dans des conditions identiques. Les droites de tendance passant par l'origine sont tracées en trait continu noir. Elles montrent dans l'ensemble une bonne linéarité du comportement de la structure vis-à-vis du niveau de charge.

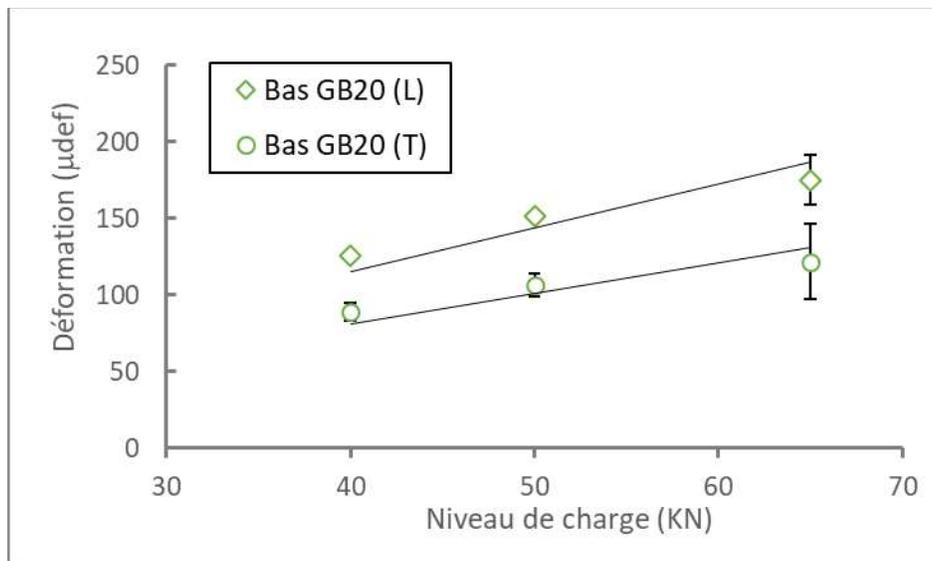


Figure 43 : extensions maximales longitudinale et transversale en bas de GB20 en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l'origine.

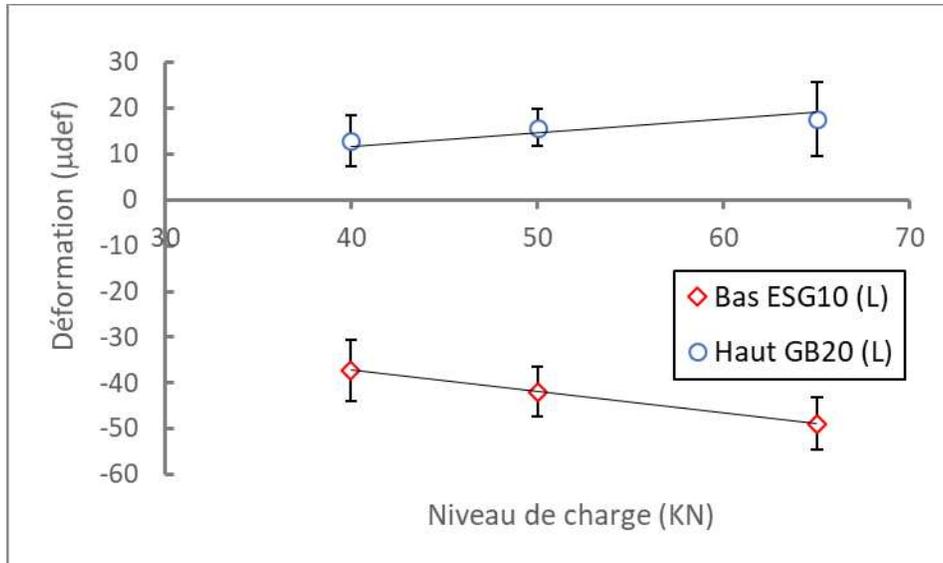


Figure 44 : extension (haut GB20) et contraction (bas ESG10) longitudinales extrêmes en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l'origine.

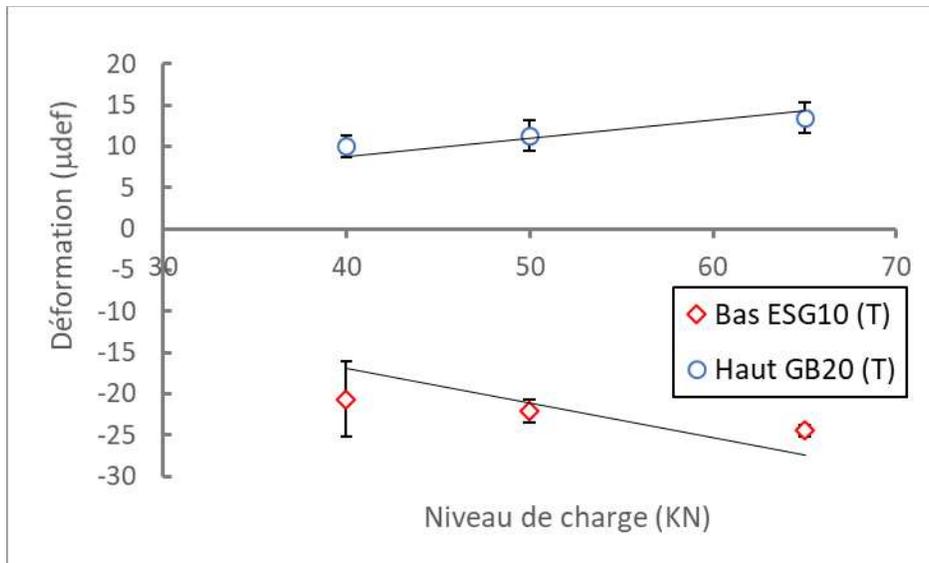


Figure 45 : extension (haut GB20) et contraction (bas ESG10) transversales extrêmes en fonction du niveau de charge. Les droites représentent les courbes de tendances passant par l'origine.

7.3 Comparaison entre résultats de l'essai D13 et calculs ViscoRoute© 2.0

La modélisation numérique de l'essai D13 (Q=40 kN) est effectuée avec ViscoRoute© 2.0 suivant les données du tableau de la Figure 28 déjà utilisé dans la mégaphase C. Seules les températures de couches ont été passées à 5°C. La Figure 46 montre un bon accord entre les valeurs de déflexion mesurée et calculée.

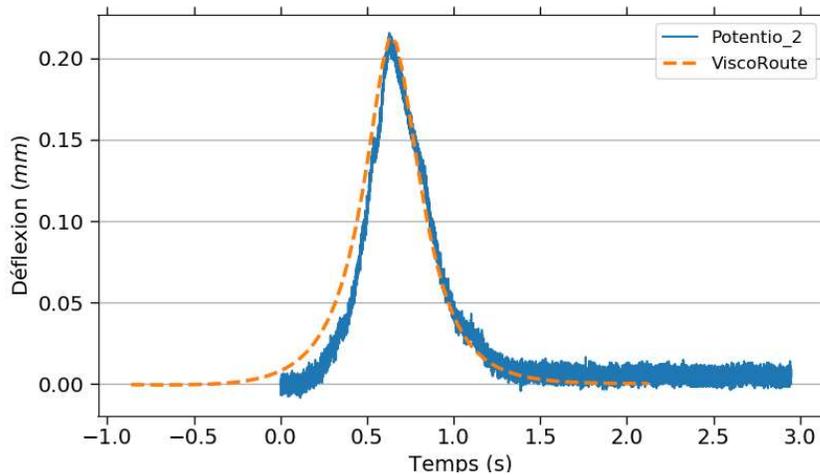


Figure 46: Comparaison entre les déflexions de surface calculée et mesurée lors du passage #1 de l'essai D13, $T_{\text{interface}}=5^{\circ}\text{C}$.

Déformations longitudinale et transversale en bas de GB20

La forme des courbes de déformation longitudinale et transversale calculée en bas de GB20 respecte bien celle relevée par les jauges TML_390 et TML_392. Comme pour la mégaphase C, les valeurs calculées sont un peu plus faibles que les valeurs expérimentales.

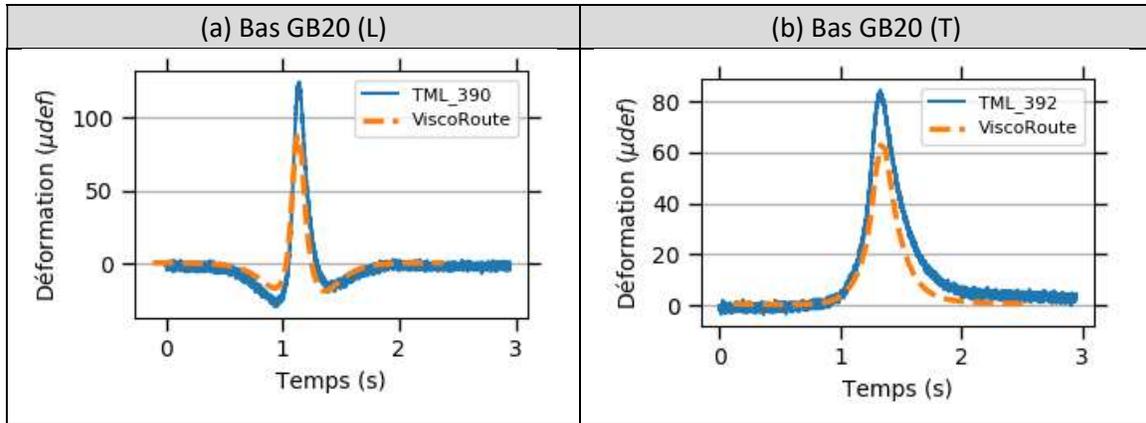


Figure 47: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées en bas de GB20 dans les directions longitudinale et transversale (essai D13, $T_{interface}=5^{\circ}C$).

Déformations longitudinale et transversale de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20

La Figure 48 montre la comparaison entre les valeurs de déformation mesurées de part et d'autre de l'interface avec la modélisation ViscoRoute© 2.0 intégrant l'interface visqueuse entre ESG10 et GB20 ramenée à 5°C. On observe un bon accord d'ensemble entre ces résultats avec des écarts à relativiser compte tenu des faibles niveaux de déformation à cette température.

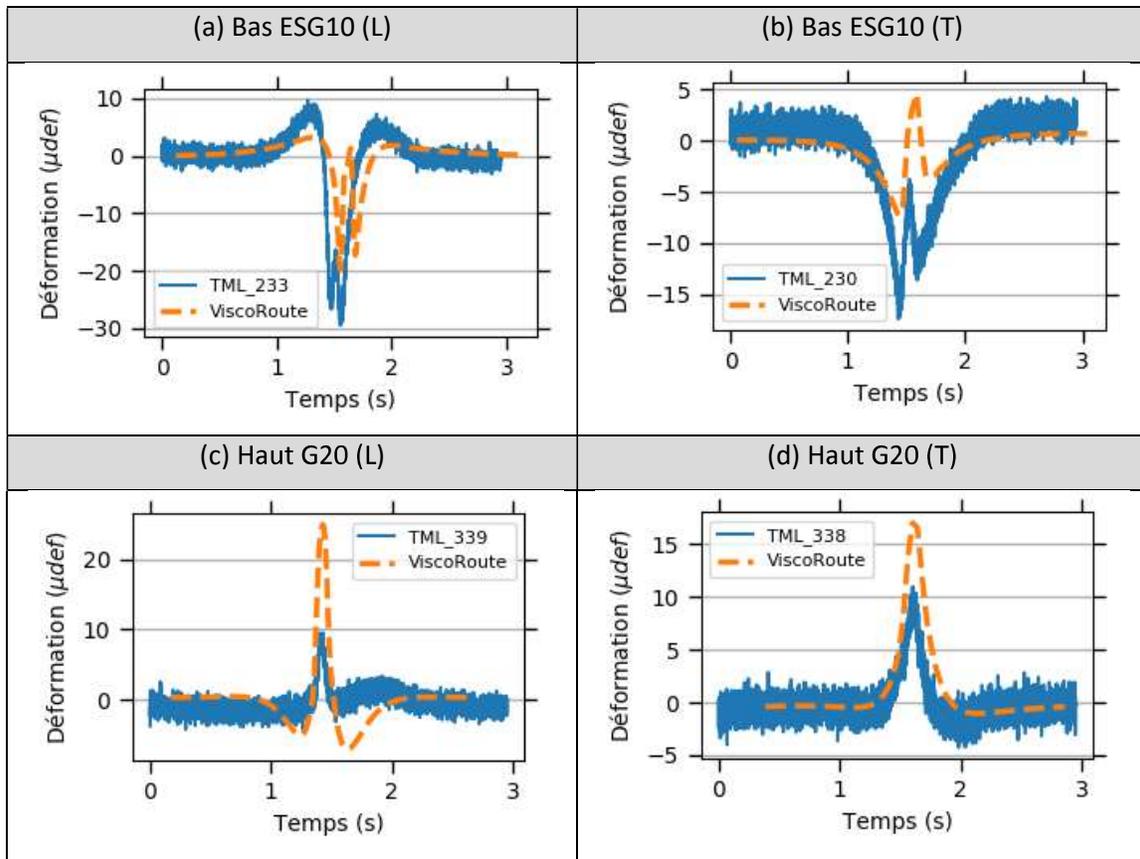


Figure 48 : Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai D13, T_interface=5°C).

La Figure 49 montre la construction approchée de la réponse théorique en bas de ESG10 pour une interface « visqueuse-frottante » à partir des réponses ViscoRoute© 2.0 avec interface visqueuse et collée. Le comportement « frottant collé » est supposé se produire, comme pour la mégaphase C, lorsque la charge se situe dans un voisinage de $\pm 15 \text{ cm}$ au droit de la jauge correspondant à une contrainte verticale de compression importante. On observe que cette construction permet de réduire la hauteur du pic central du signal en W et de se rapprocher de la mesure de la jauge. On constate également, par comparaison avec la mégaphase C, que la différence des réponses numériques avec interfaces visqueuse et collée s'estompe lorsque la température diminue.

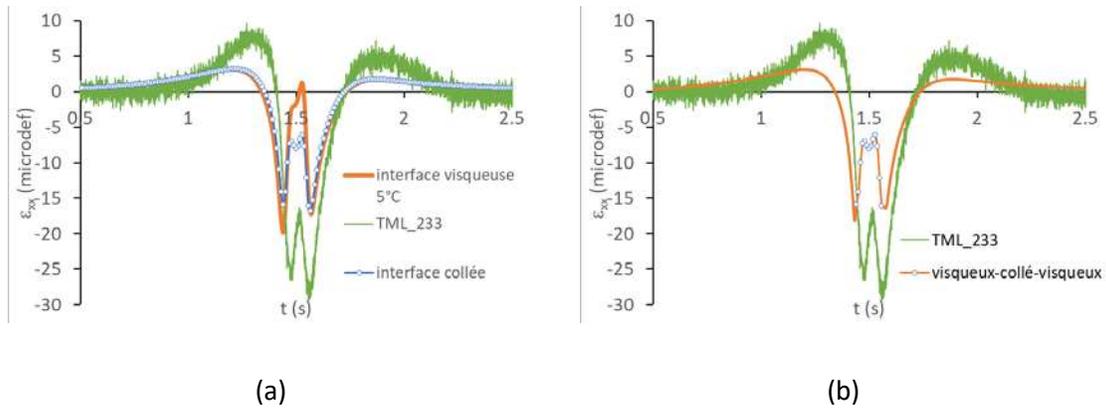


Figure 49 : (a) comparaison essai versus ViscoRoute© 2.0 pour la TML_233 en considérant des interfaces visqueuse ou collée dans les calculs. (b) Construction approchée de la réponse pour un comportement d'interface « visqueux-frottant », la zone frottante (modélisée par la solution avec interface toute collée) s'étend sur ± 15 cm de part et d'autre du centre de charge.

8 Mégaphase E_intermédiaire : Chargement mécanique en conditions sèches pour $T_{interface}=0^{\circ}\text{C}$

La mégaphase E_intermédiaire du protocole d'essai est effectuée à température d'interface constante $T = 0^{\circ}\text{C}$. Durant cette phase, trois niveaux de chargement ont été appliqués sur la surface de la chaussée : $Q=40, 50$ et 65 KN correspondant aux essais E1_inter, E2_inter et E3_inter.

8.1 Profils de température mesurés pendant l'essai E1_inter

Les profils de température mesurés pendant l'essai E1_inter sont similaires à ceux des mégaphases C et D. La température dans le sol reste essentiellement positive.

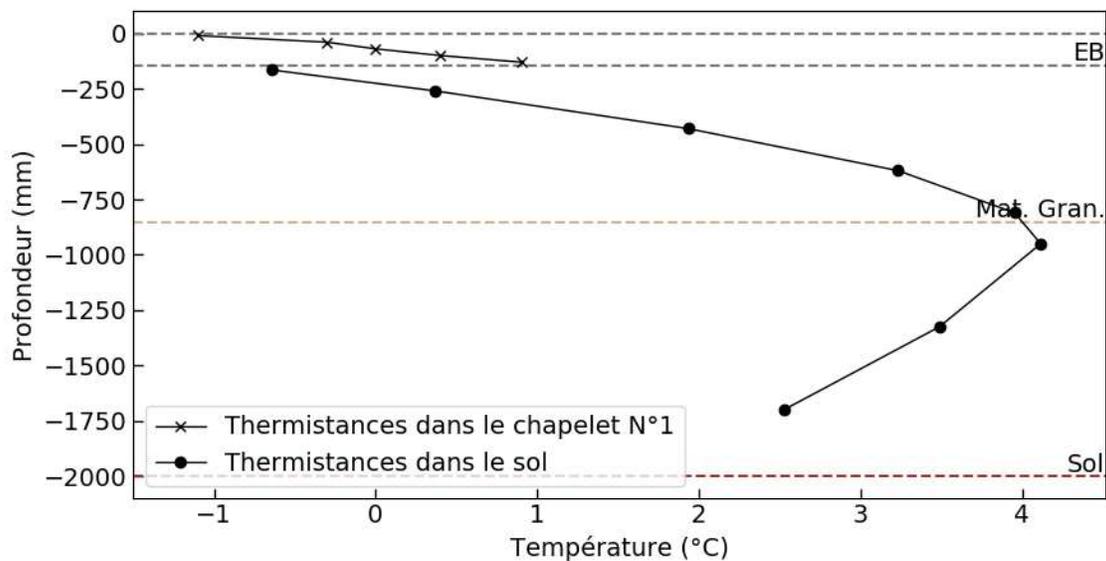


Figure 50: Profil de température dans la structure de chaussée pendant l'essai E1_inter.

8.2 Déflexion et déformations longitudinale et transversale sous charge roulante (essai E1_inter, $Q=40$ kN)

La Figure 51 illustre l'évolution de la déflexion de surface lors du passage des roues du demi-essieu sur la chaussée. On remarque sur cette figure un maximum de déflexion du même niveau que

pour l'essai D13 ($\approx 0.2 \text{ mm}$). On observe également que le signal enregistré est nettement plus bruité, peut-être en lien avec les températures négatives dans le haut du capteur ancré.

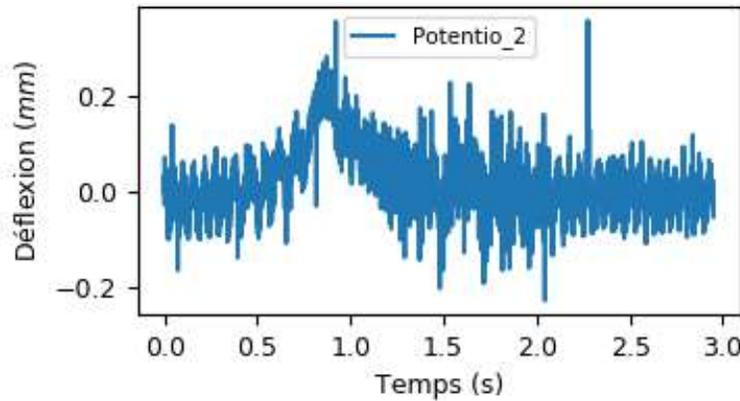


Figure 51: Déflexion de surface pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.

Les déformations enregistrées par les jauges TML montées à la base de la couche de GB20 et dans les deux directions longitudinale et transversale sont présentées sur la Figure 52.

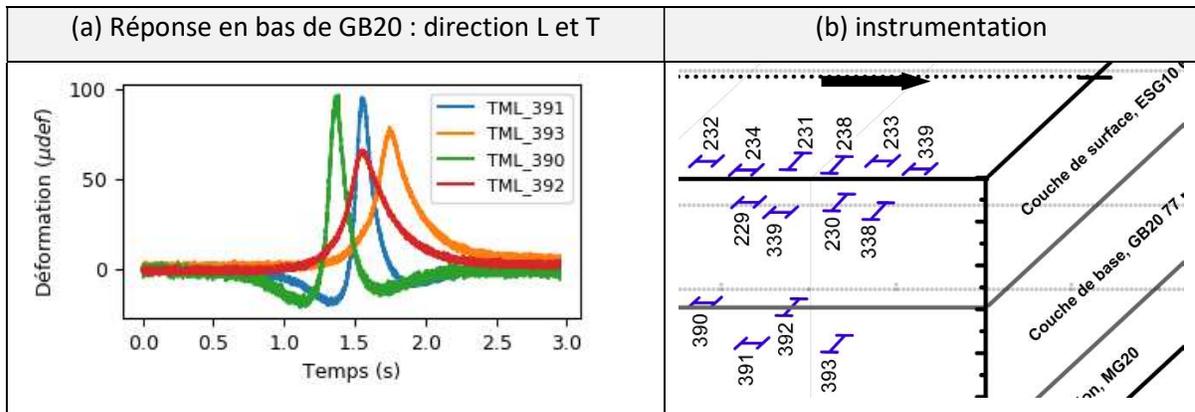


Figure 52: Déformations mesurées à la base de GB20 dans les directions longitudinale et transversale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.

Les Figure 53 et Figure 54 montrent les déformations longitudinale et transversale de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20. L'ensemble de ces courbes est très similaire à celui de l'essai D13 avec des valeurs légèrement moindres dues à la rigidification des couches d'enrobés par effet de baisse de température.

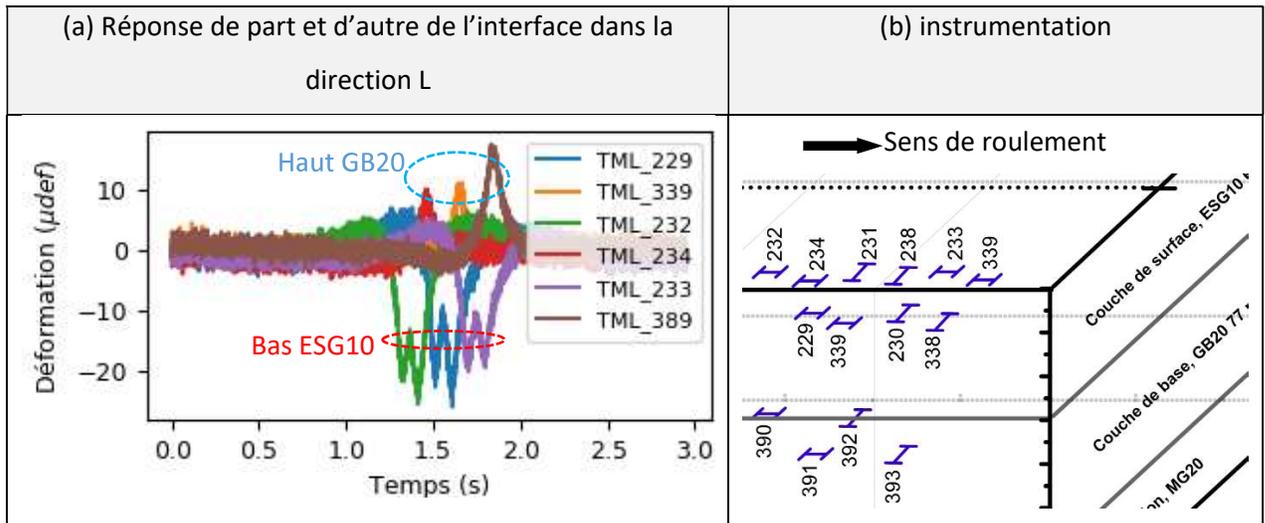


Figure 53: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction longitudinale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.

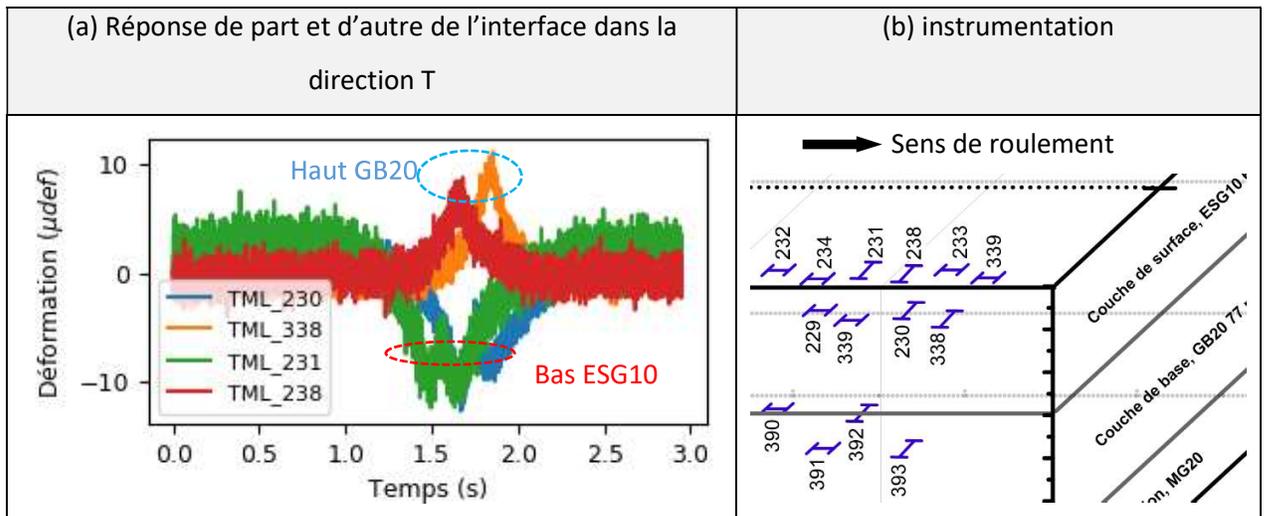


Figure 54: Comportement de l'interface ESG10/GB20 dans la direction transversale pendant le passage #1 de l'essai E1_inter.

8.3 Comparaison entre résultats de l'essai E1_inter et calculs ViscoRoute© 2.0

Les figures suivantes montrent la comparaison entre mesures et simulations ViscoRoute© 2.0 pour une température de 0°C dans les couches d'enrobé et la couche d'interface viscoélastique entre ESG10 et GB20. On obtient dans l'ensemble une bonne comparaison entre mesures et

calculs, le modèle restituant bien en particulier l'effet de rigidification des enrobés avec la diminution de température.

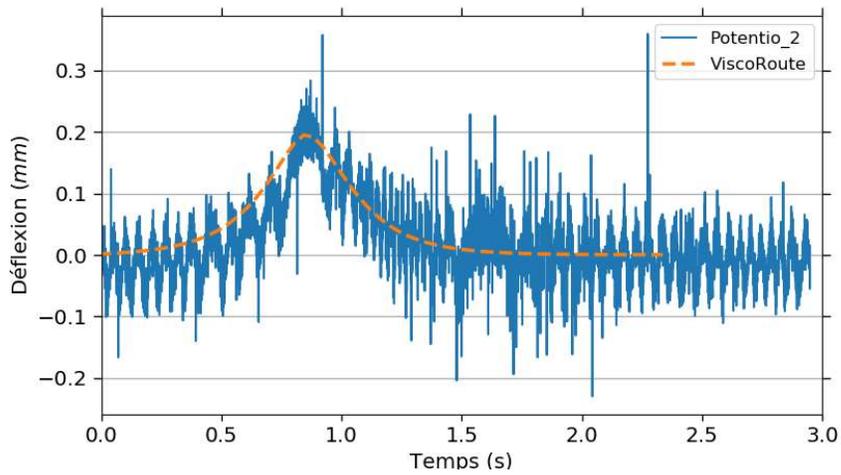


Figure 55: Comparaison entre les déflexions de surface calculée et mesurée lors du passage #1 de l'essai E1_inter.

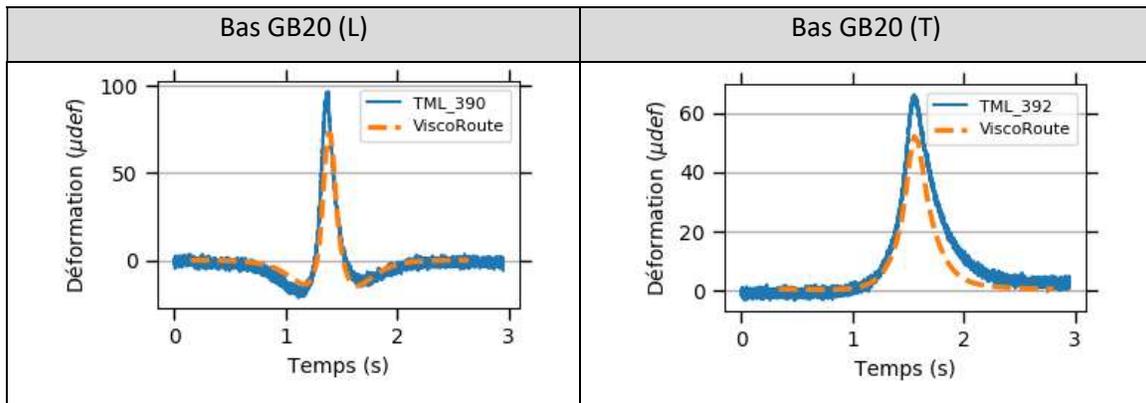


Figure 56: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées à la base de GB20 et dans la direction longitudinale et transversale (essai E1_inter).

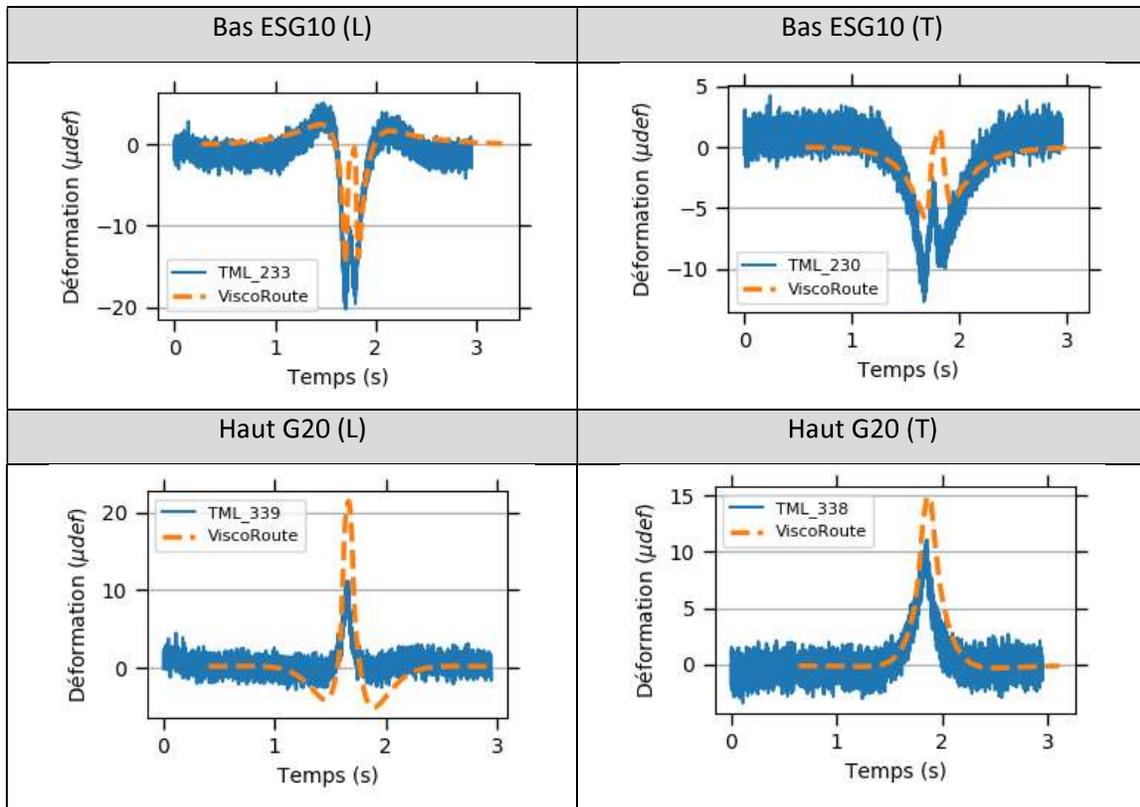


Figure 57: Comparaison entre les déformations mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface et dans la direction longitudinale et transversale (essai E1_inter).

9 Mégaphase E : Chargement mécanique en conditions sèches pour $T_{\text{interface}} = -10^{\circ}\text{C}$

La mégaphase E du protocole d'essai est effectuée à température d'interface constante $T = -10^{\circ}\text{C}$. Pendant cette phase, trois niveaux de chargement ont été appliqués sur la surface de la chaussée : $Q=40, 50$ et 65 KN correspondant aux essais E18, E19 et E20. Les courbes ci-après se réfèrent à l'essai E18.

9.1 Profils de température pendant l'essai E18

Les profils de température mesurés dans les couches d'enrobé et les couches granulaires pour les essais mécaniques E18 ($Q=40\text{KN}$) sont présentés sur la Figure 58. On observe en particulier des températures négatives sur presque toute l'épaisseur des matériaux granulaires MG20 et MG112.

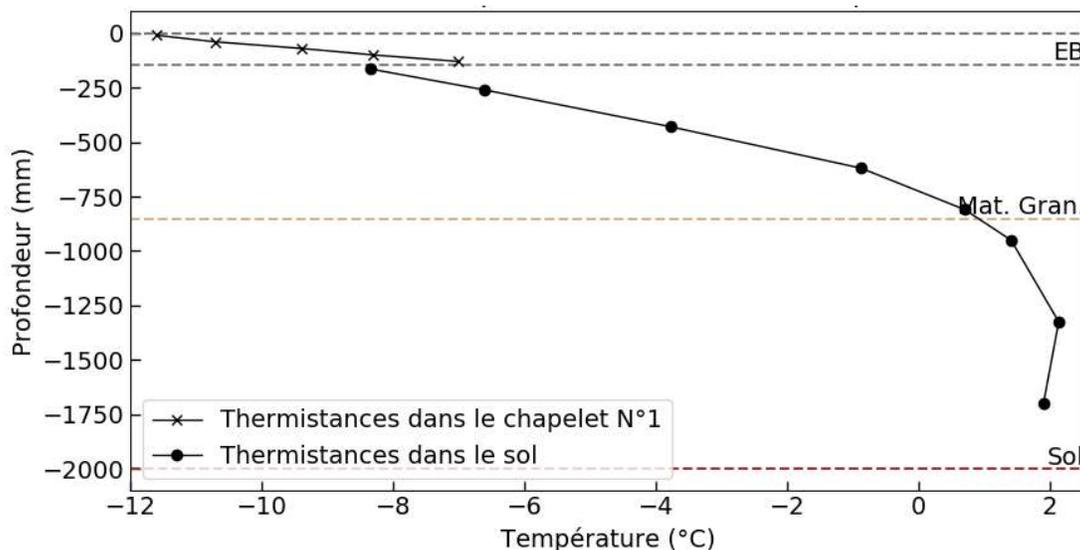


Figure 58: Profil de température dans la structure de la chaussée pendant l'essai E18.

9.2 Déflexion et déformations longitudinale et transversale en bas de GB20 sous charge roulante (essai E18, $Q=40$ kN) - modélisations

Cette phase d'essai se caractérise essentiellement par le fait de très faibles valeurs de déflexion et de déformations mesurées, fortement bruitées par rapport aux mégaphases précédentes. Le

capteur de déflexion ne montre plus de pic identifiable au passage de la charge. Cette réponse de la structure est attribuable au gel de l'eau interstitielle dans les couches granulaires MG20 et MG112, provenant de leur phase de mise en œuvre (pas encore de mouillage des couches d'enrobés à ce stade), qui entraîne une rigidification importante de ces couches.

Les Figure 59 et Figure 60 présentent la comparaison des mesures et des simulations ViscoRoute© 2.0 en termes de déflexion et de déformation en bas de GB20. Les calculs sont effectués pour deux jeux de modules d'Young des couches granulaires : le premier est celui utilisé jusqu'à présent ($E_{MG20} = 190 \text{ MPa}$ et $E_{MG112} = 160 \text{ MPa}$) ; le second est pris en multipliant ces valeurs par 20 afin de rendre compte d'un effet de gel de ces couches granulaires partiellement saturées. On constate que le second scénario permet de bien représenter les mesures confirmant l'important accroissement de portance apporté par les températures négatives des couches granulaires. Il est à noter que le facteur multiplicatif ($\times 20$) considéré dans les calculs s'inscrit dans les ordres de grandeur rapportés dans la littérature (Jean-Pascal Cloutier, 2017)⁶.

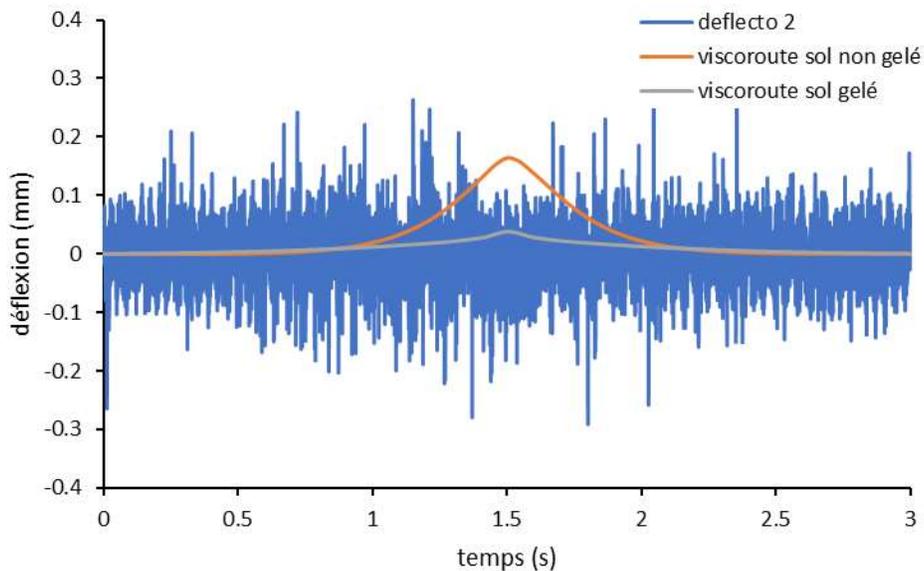


Figure 59 : déflexions mesurée et calculées avec ViscoRoute© 2.0 pour les hypothèses de couches granulaires (MG20 et MG112) non gelées et gelées.

⁶ Jean-Pascal Cloutier, Effet des charges lourdes en période hivernale, mémoire de maîtrise en Génie Civil, UL, 2017.

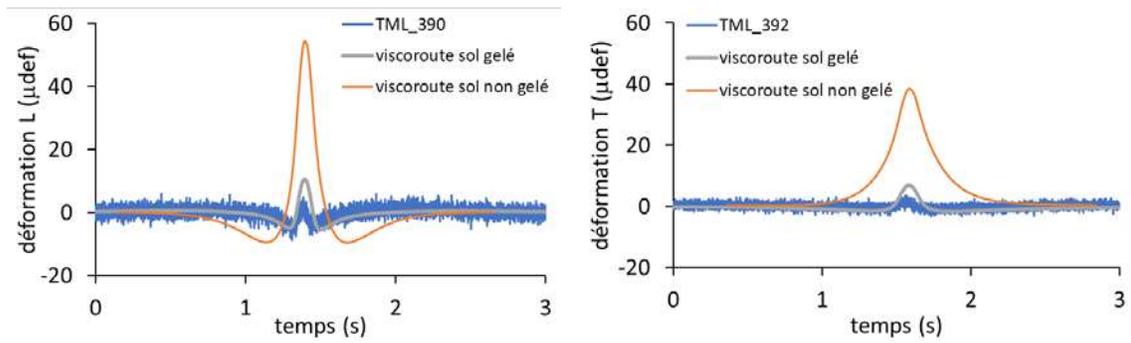


Figure 60 : déformations longitudinale et transversale en bas de GB20 mesurées et calculées avec ViscoRoute© 2.0 pour les hypothèses de couches granulaires (MG20 et MG112) non gelées et gelées.

10 Synthèse des mégaphases réalisées en conditions sèches

10.1 Déformations maximales mesurées en bas de GB20 sous charge roulante en fonction de la température

La Figure 61 résume l'effet important de la température sur les valeurs d'extension maximale mesurées en bas de GB20.

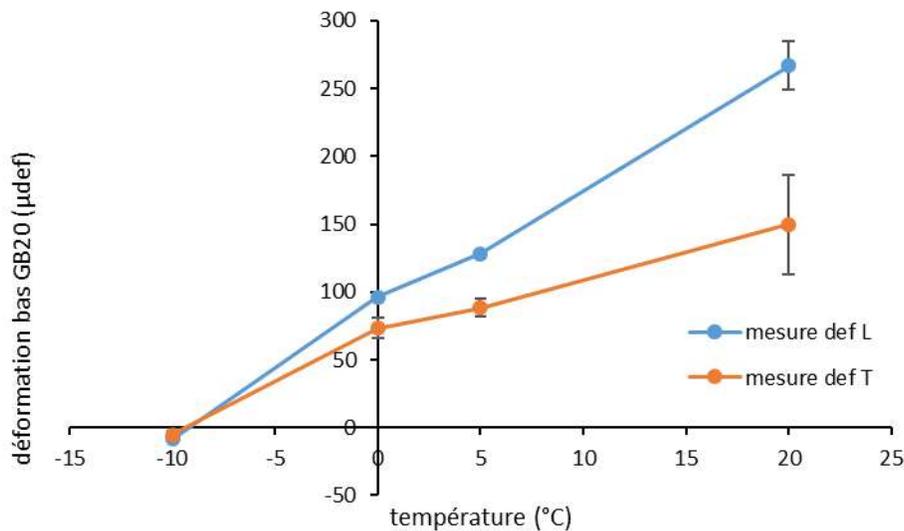


Figure 61 : extensions longitudinale et transversale maximales sous charge roulante (40 kN) mesurées en bas de GB20 en fonction de la température.

10.2 Déformations extrémales mesurées et calculées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 sous charge roulant en fonction de la température

La Figure 62 récapitule les résultats de mesure et calcul en termes de déformation maximale en bas de ESG10 (contraction) et en haut de GB20 (extension) sous charge roulante en fonction de la température. Les calculs sont effectués pour les deux hypothèses d'interface ESG10/GB20 collée et visqueuse. On voit que l'hypothèse d'interface visqueuse conduit à des résultats plus proches des mesures à 20°C, qui justifie ce choix fait systématiquement dans les calculs ViscoRoute© 2.0. On observe toutefois que pour des températures égales ou inférieures à 5°C, les deux hypothèses reviennent au même pour les valeurs maximales de déformation.

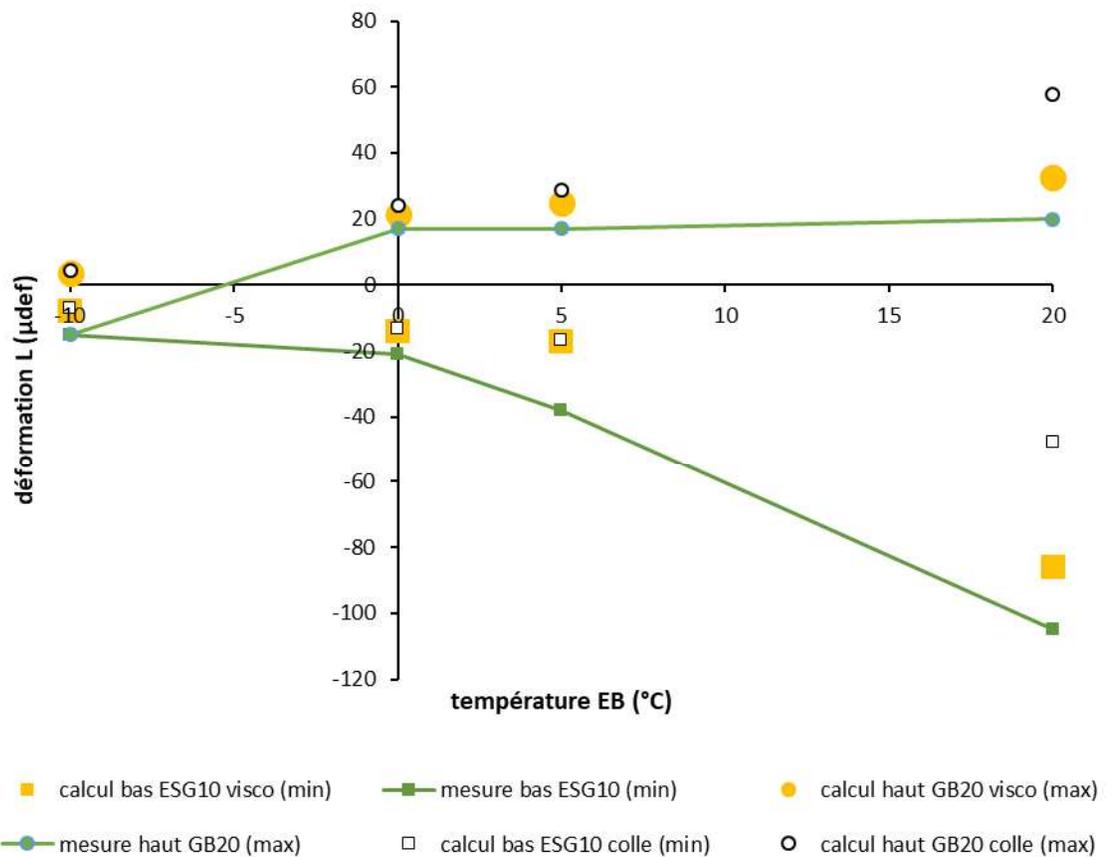


Figure 62 : déformations longitudinales maximales en haut de GB20 (extension) et en bas de ESG10 (contraction) sous charge roulante ($Q = 40 \text{ kN}$) en fonction de la température dans les couches d'enrobé bitumineux : comparaison entre mesures et calculs ViscoRoute© 2.0 effectués pour les hypothèses d'interface ESG10/GB20 collée ou visqueuse.

10.3 Récapitulatif des principales observations faites en conditions sèches

L'étude préliminaire effectuée sur la chaussée expérimentale en conditions sèches donne lieu aux conclusions suivantes.

Pour les sollicitations thermiques :

- Le dispositif d'essai permet d'atteindre la plage de température visée initialement et de contrôler la température d'interface ESG10/GB20 entre $+20^\circ\text{C}$ et -10°C .
- Le modèle thermique EF avec valeurs standard des paramètres thermiques des EB permet de bien reproduire les profils verticaux de température mesurés par les thermistances.

- Les mesures de déformation sous sollicitation thermique par les jauges TML sont obtenues après compensation thermique venant en sus des coefficients de calibration. L'ensemble des jauges fournit des mesures cohérentes excepté pour les TML en haut de GB20 dont la mise en place dans une résine époxy leur confère une rigidité sans doute trop élevée pour ce type de sollicitation. Ces jauges ne sont donc pas retenues pour l'exploitation des déformations d'origine thermique mais restent fiables pour les sollicitations sous charge roulante. De même, les mesures du déflectomètre ancré s'avèrent non exploitables sous sollicitation thermique faute de loi de compensation disponible avec la température.
- Sous sollicitations thermiques, la réponse des couches d'enrobé présente une « anisotropie structurelle » avec des déformations longitudinales très faibles vis-à-vis des déformations transversales. Pour ce type de sollicitation lente, le module apparent des EB est faible ; l'anisotropie structurelle peut alors résulter de conditions de frettage (frottement de Coulomb sous contrainte normale de poids propre) à l'interface entre couches d'EB et de matériau granulaire MG20, se traduisant différemment dans les deux directions de la structure étant donné la différence importante entre longueur et largeur de la fosse. Une modélisation simplifiée « isotrope » de ces conditions de frettage par ressorts horizontaux continus permet de bien retrouver les mesures de déformation dans les couches d'EB.

Pour les sollicitations mécaniques :

- L'ensemble des jauges TML montre des mesures répétables et de bonne qualité avec une forte sensibilité jusqu'aux faibles niveaux de déformation observé à basse température.
- Le comportement de la structure est quasi-linéaire en fonction des niveaux de charges testés.
- La réponse de la structure est fortement sensible à la température. À température positive, cette sensibilité affecte essentiellement les couches d'EB. Lorsque la température devient négative dans les couches granulaires, leur module augmente fortement par effet de gel de l'eau interstitielle conduisant à des portances très élevées et à de faibles taux de travail de la structure.

- Les modélisations ViscoRoute© 2.0 sous charge roulante permettent dans l'ensemble de simuler correctement le comportement de la structure aux différentes températures moyennant un certain nombre d'hypothèses :
 - Interface considérée collée entre GB20/MG20, le choix entre condition collée ou glissante ayant moins d'impact que précédemment du fait du module élevé des EB sous charge roulante.
 - Modules des couches granulaires multipliés par 20 à température négative.
 - Interface viscoélastique de faible épaisseur entre ESG10 et GB20 affectée des propriétés d'un bitume (avec valeur de module adaptée au choix de l'épaisseur), jouant surtout dans les essais pratiqués à 20°C. Ce type d'interface permet de rendre compte de forts gradients de déplacements horizontaux de part et d'autre de l'interface tout en conservant l'hypothèse de continuité physique de l'interface démontrée par les essais AMAC initiaux.
 - À 20°C, un meilleur accord mesures/simulations est obtenu en considérant des conditions alternées d'interface viscoélastique/collée/viscoélastique en fonction de la position de la charge, représentatives d'un contact visqueux avec frottement de Coulomb sous contrainte normale élevée.

11 Mégaphase F : Mouillage de la structure

La mégaphase F correspond au changement de conditions environnementales appliquées à la planche d'essai par le biais d'une modification de la teneur en eau dans l'enrobé. Cette section décrit le processus suivi pour modifier la quantité d'eau dans les pores des enrobés. Deux appareils sont utilisés pour estimer le degré de saturation des matériaux bitumineux dans ce projet. Les deux outils permettent d'estimer la constante diélectrique des matériaux; cette valeur est fortement influencée par la teneur en eau dans un matériau. Ce paramètre est significativement influencé par la teneur en eau dans le milieu poreux. Le premier appareil est un Percomètre appartenant à l'Université Laval. Le second appareil est une sonde Capacitive appartenant à l'Université Gustave Eiffel.

Avec la sonde Capa, deux électrodes ont été considérées, soit ME2 et ME4. La première a été choisie en raison de la profondeur d'investigation (36 mm) très proche de celle du percomètre (environ 30 mm). La deuxième a été choisie en raison de sa profondeur d'investigation (54 mm) adapté à la stratigraphie des couches dans la fosse expérimentale. La couche de surface ayant une épaisseur de 68 mm (réf au tableau des épaisseurs construction), et considérant la présence de jauges TML et de câbles à la base de la couche de surface, l'électrode ME4 semblait la plus pertinente pour mesurer sur une épaisseur significative dans la couche de surface, tout en évitant de mesurer au-delà de son épaisseur ou d'éviter/minimiser les perturbations potentielles pouvant être associées aux instruments. Néanmoins, suite aux analyses préliminaires et à la volonté d'obtenir un regard sur le degré de saturation le plus représentatif de la majeure partie de la couche de surface, seulement les résultats obtenus avec l'électrode ME4 ont été considérés.

11.1 Calibration de laboratoire à l'Université Laval

Des plaques d'enrobé ESG10 ont été reconstituées au laboratoire d'enrobés du Ministère des Transports. Les mêmes matériaux et constituants que ceux utilisés sur la fosse ont été utilisés. Un processus itératif a été suivi lors de la confection des échantillons afin d'obtenir un pourcentage

de vides (V_a) des plaques représentatifs de la couche de surface de la planche expérimentale, plus particulièrement dans le secteur des jauges TML. Les plaques livrées avaient un pourcentage de vides d'environ 10%. Les dimensions étaient de 500 mm de longueur, 180 mm de largeur et 100 mm de hauteur. Deux plaques ont été utilisées; les caractéristiques des plaques sont présentées au Tableau 9, notamment la densité du mélange D_{mb} et le volume total V_T . Il est noté que le degré de saturation initial (S_r ini) des plaques est supérieur à 0, parce que les calculs volumétriques ont été effectués par une pesée immergée. La Figure 63 montre les échantillons utilisés.

Tableau 9. Caractéristiques des plaques avant le début de la calibration de laboratoire

M_s (g)	D_{mb}	V_T (m ³)	% V_a (%)	S_r ini (%)
19966	2373,2	0,008413	9,7	24,0
20010	2360,8	0,008476	10,1	22,4



Figure 63. Plaques de ESG10 préparées par le MTQ

Le processus expérimental suivant a été posé :

- Prise de mesures à l'état de saturation initial avec les deux appareils sur 10 points de mesure équidistants sur la partie centrale des plaques. Pour chaque point de mesure, une moyenne est calculée à partir de 5 valeurs obtenues à la sonde Capa et 3 valeurs obtenues au percomètre. Les valeurs moyennes extrêmes minimum et maximum trouvées dans les 10 points de mesure sont retirées. Deux électrodes ont été utilisées avec la sonde Capa (ME2 et ME4), mais seulement les mesures avec la sonde ME4 ont été retenues en

finalité. Chaque prise de mesures a été couplée avec la mesure de la masse des plaques afin de suivre le degré de saturation;

- Saturation des plaques dans une chambre de pression/vide (Figure 64). Les plaques ont été plongées dans de l'eau et mise sous vide (-100 kPa) pendant 1 h, suivi d'un cycle de pression de 500 kPa pendant 0,5 h. Des valeurs de degré de saturation de 86,1 et 83,4 % ont été mesurées tout de suite à la sortie de la chambre de pression.
- Prise de mesures de la masse des plaques combinées aux mesures avec les deux appareils (10 points moyens par appareil par prise de mesures) pour différents temps suivant la sortie de la chambre de saturation. Les plaques ont été laissée à l'air libre pour sécher graduellement.



Figure 64. Chambre de pression/vide utilisée pour la saturation des plaques de ESG10

Le Tableau 10 présente les mesures expérimentales moyennes de constante diélectrique recueillies au percomètre (P) et à la sonde Capa (ME2 et ME4) pour les deux plaques. Les conditions expérimentales, soient la température ambiante (T_{amb}), la température de surface

(T_{surf}) et la pourcentage d'humidité relative (HR), sont également rapportées. Durant cette expérience, tel qu'il peut être observé au Tableau 10, il n'a pas été possible de trouver une corrélation significative entre les mesures de constante diélectrique obtenues avec le percomètre et la sonde Capa, ou entre les valeurs de la sonde Capa et le degré de saturation. En revanche, une corrélation significative existe entre la valeur mesurée au percomètre et le degré de saturation (Figure 65). L'équation servant à relier le degré de saturation (S_r) et la constante diélectrique obtenue au percomètre (P) est définie par

$$S_r (\%) = \phi \times P + \delta = 45,749 \times P - 142,96 \quad (10)$$

dans laquelle ϕ et δ sont la pente et l'ordonnée à l'origine.

Tableau 10. Mesures expérimentales moyennes à l'Université Laval pour les deux plaques de ESG10

	Tamb (%)	HR (%)	T_{surf} (%)	S_r (%)	P	ME2	ME4
2020-11-05	21,3	21,0	23,9	23,2	3,69	4,66	5,25
2020-11-05	21,8	30,3	21,6	77,9	4,67	5,43	5,96
2020-11-13	21,8	31,5	24,4	59,0	4,38	5,27	6,02
2020-11-16	21,5	30,5	24,5	50,7	4,25	5,34	5,93
2020-11-18	21,5	32,0	24,4	48,9	4,05	5,22	5,81
2020-11-20	21,8	31,3	24,1	47,3	3,97	5,18	5,76
2020-11-23	21,8	32,0	24,8	45,1	4,16	5,16	5,75
2020-11-25	21,8	29,8	24,2	41,9	3,80	5,21	5,79
2020-11-27	21,8	30,5	24,4	40,0	4,02	5,28	5,98
2020-11-30	21,8	30,5	24,5	38,2	4,15	5,38	6,09
2020-12-02	21,8	32,3	24,3	37,7	4,13	5,25	5,89
2020-12-04	21,9	31,0	24,2	36,3	3,85	5,51	6,36
2020-12-07	22,0	31,0	24,4	34,7	3,95	5,45	5,95
2020-12-09	21,8	30,8	24,1	34,3	4,01	5,47	5,85
2020-12-11	21,8	30,5	24,2	33,7	4,05	5,71	6,09
2020-12-16	22,3	26,8	24,8	32,2	3,85	5,08	5,68
2020-12-17	ND	ND	24,4	31,9	3,75	4,74	5,87

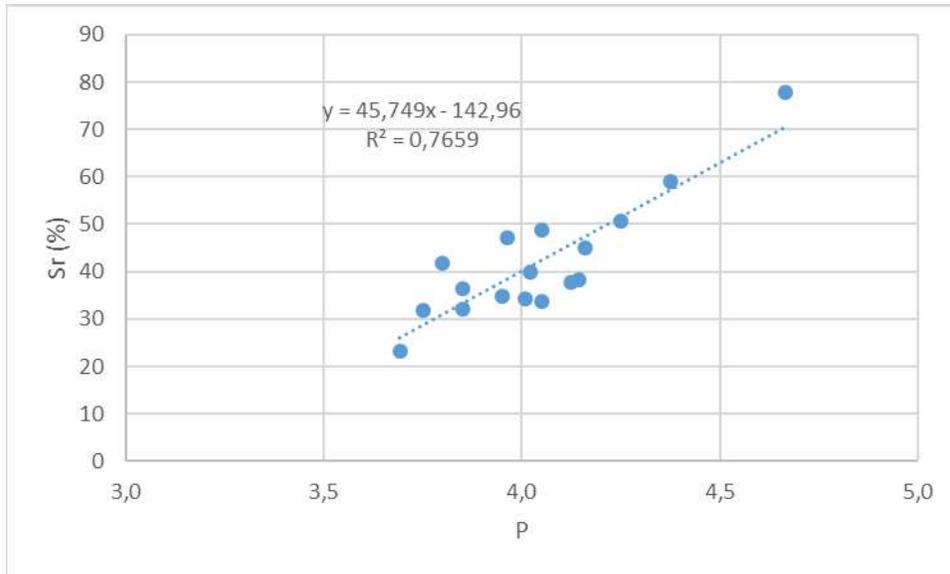


Figure 65. Relation entre le degré de saturation et la valeur mesurée au percomètre

11.2 Préparation de la fosse pour l'augmentation du degré de saturation de la couche de surface

Suite aux essais en conditions sèches, la surface de la fosse a été préparée afin de créer un bassin permettant d'accumuler de l'eau sur la surface de la chaussée. Le concept choisi pour augmenter le degré de saturation de la couche de surface est présenté à la Figure 66. Un bassin constitué de bordures de bois contreplaqué a été utilisé. La hauteur des parois du bassin est de 100 mm. Chaque joint entre les panneaux de bois, ainsi qu'avec l'enrobé, a été scellé avec du silicone et du produit bitumineux utilisé pour le scellement de fissures. Les panneaux transversaux (pointillé bleu, Figure 66) sont, quant à eux, insérés dans deux traits de scie de 25 mm de profondeur effectués près de chaque extrémité de la planche d'essai. Le concept prévoyait que l'eau puisse potentiellement circuler sous les panneaux pour ressortir en surface pour $500 > Y > 5500$ mm en direction transversale par rapport à l'axe de roulement. C'est la raison pour laquelle des trous de carottage était initialement prévus. Ce phénomène d'écoulement ne s'est pas produit et les trous de carottage n'ont pas été faits.

Afin d'appliquer des efforts de pression à l'eau dans le bassin dans l'objectif de favoriser la pénétration dans le matériau, des panneaux de bois contreplaqué ont été placés en surface de la fosse, et la roue a circulé sur les panneaux avec une charge faible de 500 kg lorsque de l'eau a été ajoutée dans le bassin. Cela a permis d'appliquer des cycles de pression / succion sur l'eau dans le bassin en surface de la couche de ESG10. Les Figure 67 à Figure 70, ainsi que la Figure 74, montrent quelques images du bassin et de la fabrication.

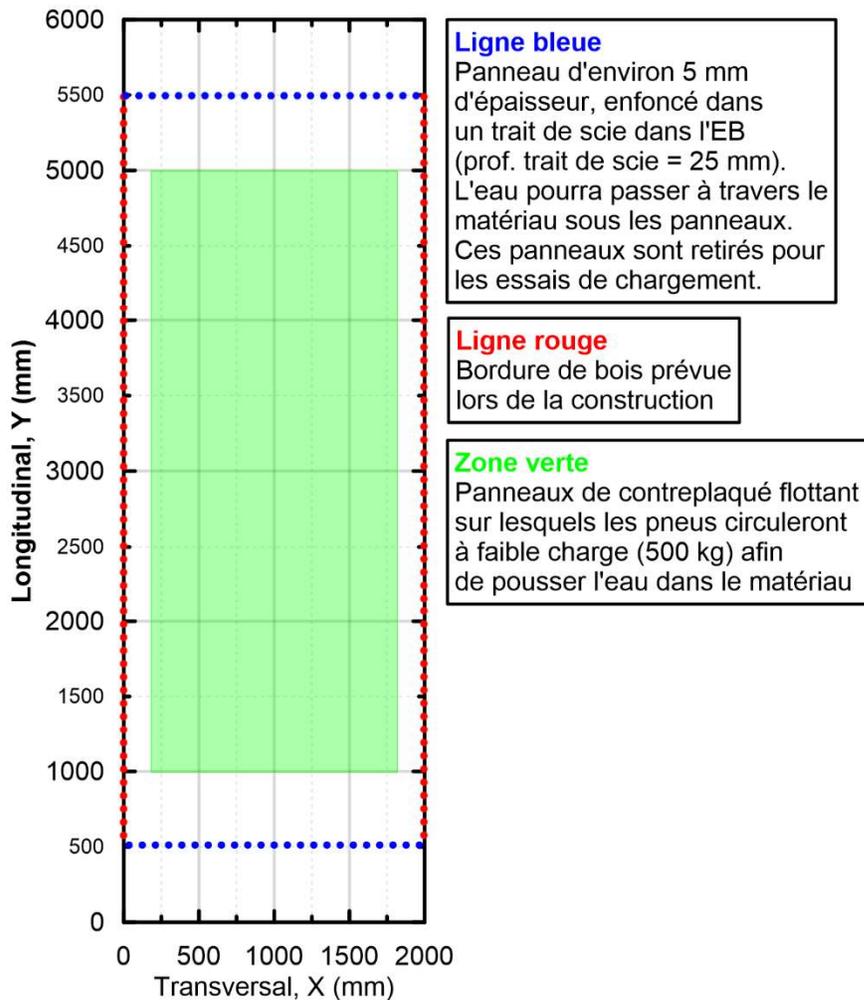


Figure 66. Schéma conceptuel du bassin permettant d'immerger la surface de la chaussée



Figure 67. Trait de scie pour l'insertion de la paroi transversale du bassin



Figure 68. Exemple de joints mis en œuvre dans le bassin

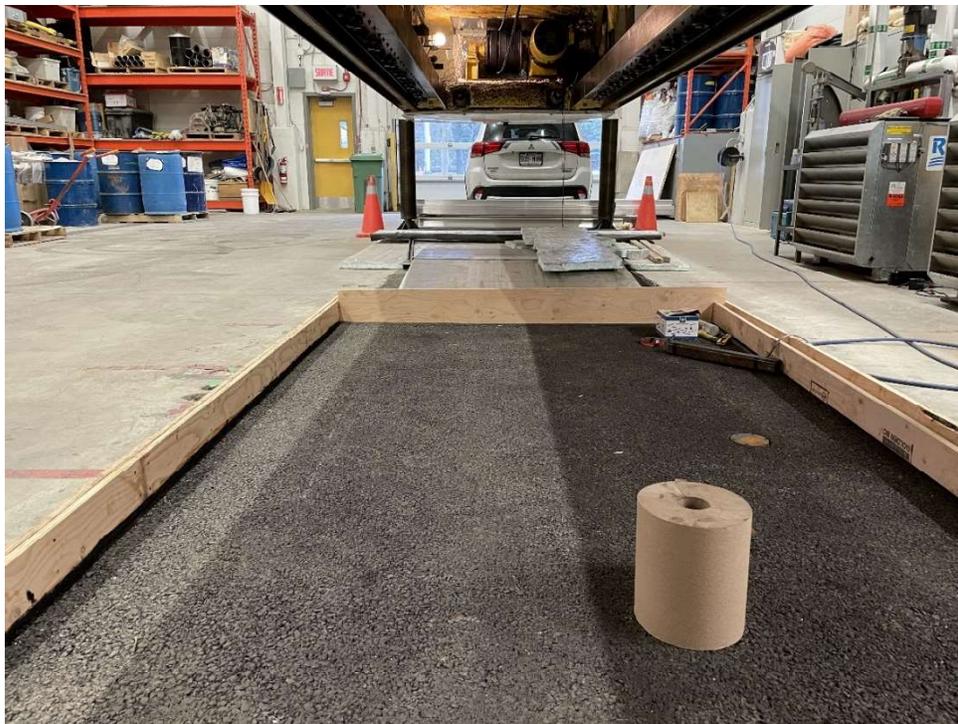


Figure 69. Bassin mis en place pour le processus de saturation (1)

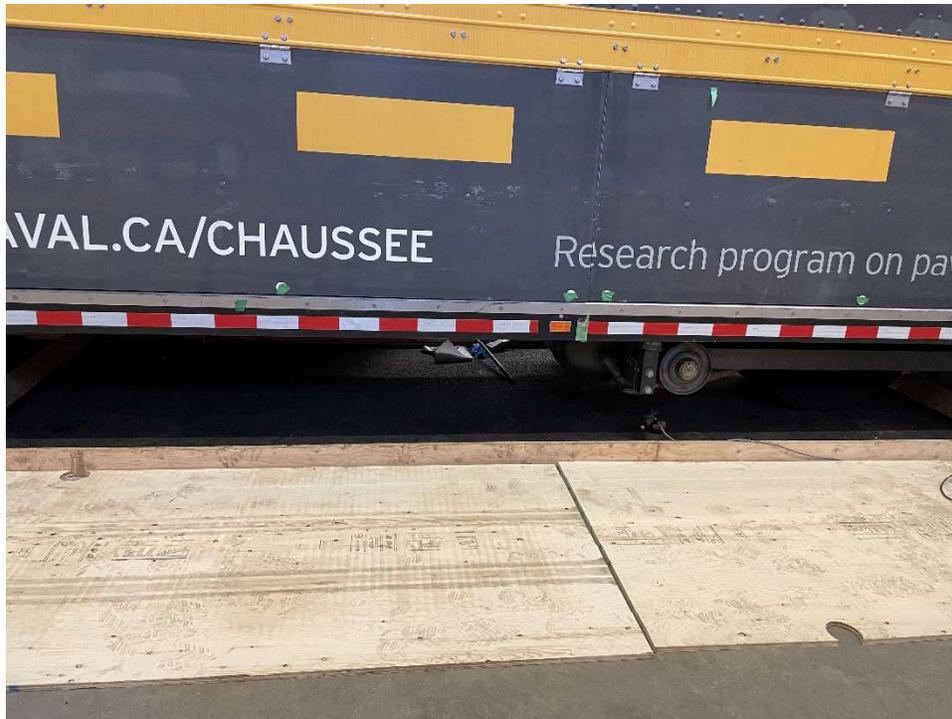


Figure 70. Bassin mis en place pour le processus de saturation (2) et panneaux de contreplaqués

Il doit être noté que le secteur choisi pour l'estimation de la teneur en eau, soit essentiellement le secteur où se trouvent les jauges TML, est un point bas. Ainsi, lorsque de l'eau est ajoutée dans le bassin, l'eau s'accumule dans ce secteur en premier. Des essais préliminaires pour l'ajout d'eau ont permis de constater que, malgré les efforts mis en place pour créer un bassin étanche, de l'eau s'infiltrait dans la chaussée. L'augmentation était perceptible sur le niveau de la nappe phréatique et sur la lecture des capteurs de teneur en eau. Comme les capteurs de teneurs en eau ont été positionnés de façon à détecter des infiltrations latérales, leur réaction lorsque de l'eau était appliquée en surface laisse penser que l'eau arrivait à s'infiltrer entre autres le long des parois latérales. Néanmoins, il doit être rappelé que des drains géotextiles verticaux ont été utilisés le long des parois; ceux-ci ont probablement contribué à diriger une partie de l'eau infiltrée vers le fond de la fosse.

Les changements hydriques sont discutés dans la prochaine section.



Figure 71. Ajout d'eau dans le bassin

11.3 Calibration et validation initiale sur la fosse expérimentale

Des mesures ont été prises sur la fosse expérimentale avec le percomètre et avec la sonde Capa (ME4 seulement). Il a été choisi de concentrer les mesures dans le secteur où des mesures mécaniques associées au revêtement sont collectées (principalement le secteur des jauges TML). Transversalement, des mesures ont été prises sous chaque axe de roue (axe 1 et axe 2), entre les deux pneus, ainsi que de chaque côté du jumelage. La position de chacune des lignes transversales de mesures a été soigneusement choisie afin d'être positionnées entre deux jauges TML placées à la base de la couche de surface ESG10. La Figure 72 et la Figure 73 présentent des schémas de la position des mesures expérimentales. Un total de 29 points de mesure a été utilisé. Il est constaté que les points de mesures sont situés dans les intervalles $500 < X < 1500$ (transversal) et $3000 < Y < 4638$ (longitudinal). Cette sous-zone d'essais évite notamment les secteurs où les vides

sont faibles; l'analyse fine des vides interpolés dans ce secteur montre que la moyenne du pourcentage de vides est estimée à 10,5%. Cette teneur en vides relativement élevée peut faciliter l'augmentation du degré de saturation de la couche de surface.

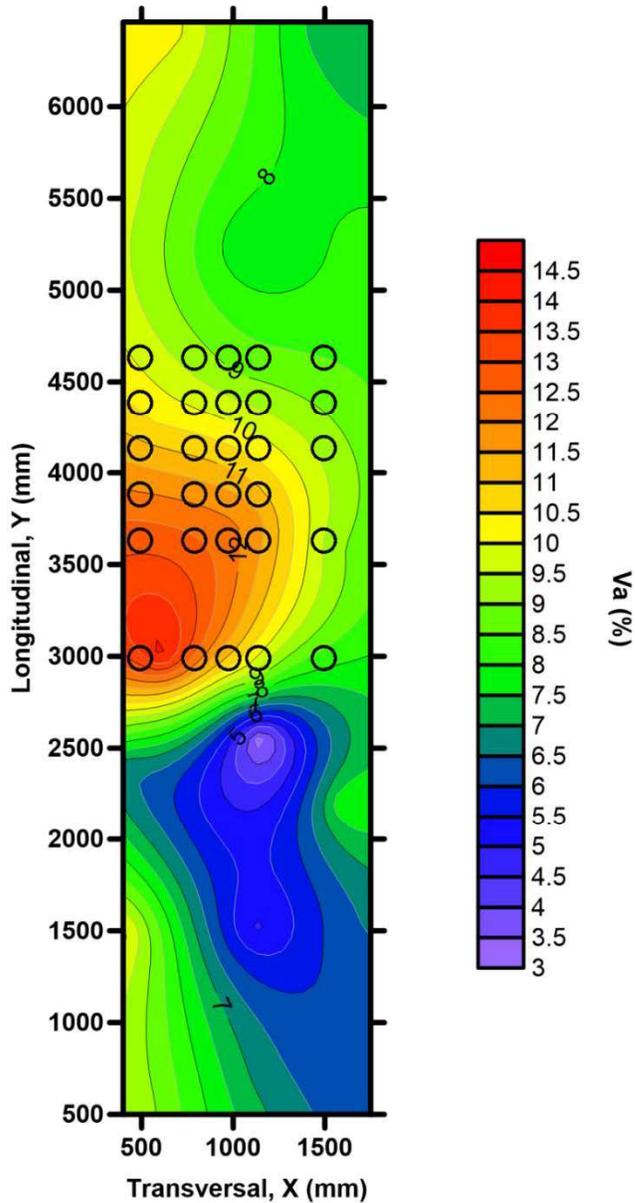


Figure 72. Position des points de mesure au percomètre et à la sonde Capa sur la planche expérimentale relatif à la distribution des vides dans la couche de surface

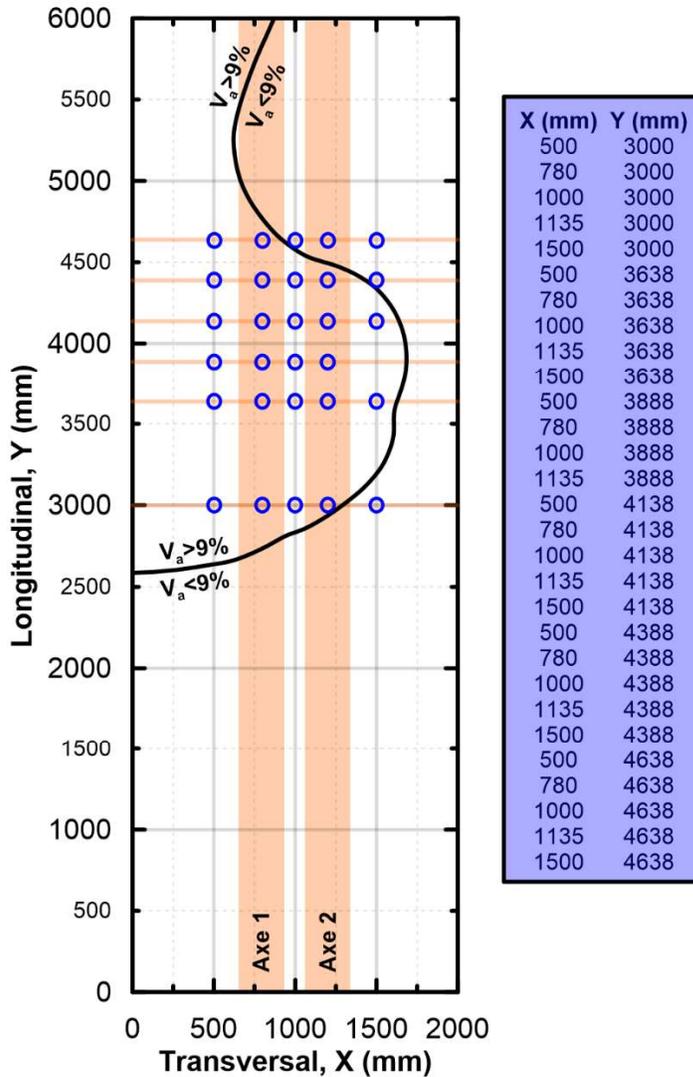


Figure 73. Position des points de mesure au percomètre et à la sonde Capa sur la planche expérimentale relatif à la distribution des vides dans la couche de surface et à la position des roues

La Figure 74 montre le marquage des emplacements où les mesures sont prises. Les rectangles oranges servent à positionner la sonde Capa. Les mesures au percomètre sont effectuées en plaçant l'appareil directement au centre de la zone rectangulaire. À chaque point de mesure, 3 valeurs de constante diélectrique sont obtenues avec le percomètre et 5 avec la sonde Capa.



Figure 74. Marquage des points de mesures pour la sonde Capa et le percomètre afin d'estimer la teneur en eau

Une calibration relative des appareils de mesure a été effectuée directement sur la planche d'essai. Des mesures ont été prises à l'état sec, suite à une période d'immersion, ainsi que suite à un séchage progressif. Il est posé comme hypothèse que le degré de saturation initial de l'enrobé bitumineux ESG10 est égal à 0 %; ce principe sera utilisé pour le calcul du degré de saturation.

Le *Tableau 11* présente la séquence des mesures qui ont été effectuées en vue de faire la calibration relative des deux appareils et d'effectuer la saturation de la couche de surface. Il est constaté que différentes phases de mouillage ont été appliquées en vue d'optimiser les mesures et le processus d'augmentation du degré de saturation. Après une première tentative de mouillage avec succès mitigée (16 décembre), l'étanchéité a été retravaillée et de meilleurs résultats ont pu être obtenus. Afin d'améliorer l'étanchéité, le joint entre les bordures de bois et

l'enrobé a été retravaillé sur tout le périmètre. Une couche épaisse de pâte cimentaire a été appliquée sur une bande d'environ 150 mm en surface de l'enrobé ESG10 et sur la bordure de bois. Le 18 décembre, comme il a été constaté qu'il semblait possible d'augmenter le Sr en peu de temps, dans le contexte du fort pourcentage de vides interstitiels et du mécanisme de charge mis en place, des mesures ont été prises et la chaussée a été laissée au repos pour la période des fêtes. Au retour (7 janvier), le degré de saturation semblait toujours relativement élevé. La chaussée a été donc été immergée pour quatre jours consécutifs avec chargements sur les panneaux de contreplaqué et des mesures sur chaussée humide ont été prises le 12 janvier.

Tableau 11. Séquence d'actions pour la calibration relative des équipements de mesure

Date	État	Remarques
15 décembre 2020	Sec	Aucune
16 décembre 2020	Partiellement humide	Tentative de remplissage du bassin, mais l'eau s'évacue assez rapidement. L'effet sur le degré de saturation apparaît par conséquent limité.
18 décembre 2020	Humide	Travaux pour améliorer l'étanchéité ont eu lieu le 16 et 17 décembre. L'effet est notable et il est possible de garder l'eau sur la chaussée beaucoup plus longtemps. La couche de surface a été immergée du 17 au 18 décembre avec action du chariot. Des mesures sont prises le 18 décembre.
7 janvier 2021	Apparence sèche	Aucun remplissage du bassin depuis le 18 décembre 2020. Néanmoins, les mesures semblent montrer que l'augmentation du degré de saturation du 18 décembre était significative, car les valeurs demeurent élevées.
12 janvier 2021	Humide	Bassin rempli du 8 janvier au 12 janvier avec action de la roue. Mesures suite à l'enlèvement de l'eau en excès.

Le *Tableau 12* présente les mesures collectées pour les 29 points de mesure lors des 5 dates de mesures. Les valeurs moyennes par date sont aussi rapportées.

Tableau 12. Mesures sur la planche expérimentale avec la sonde Capa et le percomètre pour la calibration relative

Position en plan	2020-12-15				2020-12-16				2020-12-18				2021-01-07				2021-01-12			
	Date	HR	Tamb	État	Date	%HR	Tamb	État	Date	%HR	Tamb	État	Date	%HR	Tamb	État	Date	%HR	Tamb	État
X (mm)	Y (mm)	P	ME4	Tsurf (°C)	Tsurf (°C)	ME4	Partiellement humide	Tsurf (°C)	P	ME4	Humide	Tsurf (°C)	P	ME4	Apparence sèche	Tsurf (°C)	P	ME4	Humide	Tsurf (°C)
500	3000	3,83	6,41	21,4	2,97	6,98	19,9	19,9	5,47	8,16	16,9	16,9	4,98	7,38	20,4	20,4	5,33	8,92	15,7	
795	3000	3,97	6,49	21,4	2,80	6,64	20,1	20,1	4,83	8,28	16,7	16,7	4,93	6,64	20,55	20,55	4,37	8,43	15,8	
980	3000	4,57	6,37	21,5	3,43	7,17	20,3	20,3	5,93	8,58	16,8	16,8	5,17	6,91	20,55	20,55	6,03	7,97	16,5	
1145	3000	3,83	6,71	21,5	3,07	6,83	20,4	20,4	4,90	7,82	16,4	16,4	4,65	7,02	20,6	20,6	5,10	8,09	16,2	
1500	3000	5,10	6,83	21,5	4,77	7,17	20,4	20,4	6,20	8,28	16	16	5,68	7,63	20,5	20,5	6,13	8,77	17,5	
500	3638	3,80	6,33	21,2	4,57	6,71	18,8	18,8	6,30	8,20	16,5	16,5	5,80	7,29	20,25	20,25	6,17	8,35	15,9	
795	3638	2,73	6,83	21,5	3,83	6,64	18,9	18,9	4,83	8,16	16,2	16,2	4,53	7,63	20,3	20,3	5,07	8,32	16,9	
980	3638	3,77	6,71	21,4	4,90	7,02	19,3	19,3	5,93	8,32	16	16	5,53	7,57	20,45	20,45	6,37	7,59	16,1	
1145	3638	2,57	6,41	21,4	4,00	6,68	19,5	19,5	5,30	7,82	15,6	15,6	5,20	7,08	20,5	20,5	4,63	8,28	16,4	
1500	3638	3,60	6,10	21,3	4,70	6,22	20	20	5,90	7,55	15,2	15,2	5,32	6,89	20,3	20,3	5,93	7,82	17	
500	3888	3,97	7,10	21	5,10	7,59	18,3	18,3	6,07	8,47	15,6	15,6	5,82	7,46	20,3	20,3	6,57	8,89	15,6	
795	3888	2,97	6,60	21,2	3,37	6,94	18,4	18,4	5,10	7,71	15,3	15,3	4,52	7,31	20,35	20,35	5,00	8,32	16,4	
980	3888	3,67	7,10	21,2	4,60	7,32	19	19	5,20	8,16	14,9	14,9	5,45	7,97	20,35	20,35	5,77	8,70	16,7	
1145	3888	2,57	6,56	21,2	3,10	6,87	19,2	19,2	5,60	7,93	14,7	14,7	4,60	7,36	20,35	20,35	4,53	8,28	17,6	
500	4138	4,53	6,71	20,7	4,67	7,40	17,5	17,5	5,90	7,82	15,2	15,2	5,97	8,01	20,05	20,05	6,50	8,58	15,1	
795	4138	2,83	6,56	20,9	4,30	7,44	17,5	17,5	4,23	7,97	14,7	14,7	4,45	7,88	20,2	20,2	4,90	8,32	16,1	
980	4138	4,10	6,83	20,9	4,53	7,13	17,7	17,7	5,23	7,78	14,4	14,4	5,35	7,57	20,3	20,3	6,50	8,39	15,9	
1145	4138	3,27	6,71	21	3,57	6,94	18,9	18,9	4,80	7,82	14,1	14,1	5,13	7,74	20,3	20,3	5,00	8,35	17,2	
1500	4138	4,00	6,64	20,8	4,73	6,79	19,4	19,4	6,23	7,55	13,4	13,4	5,80	7,67	20	20	6,10	8,16	16,5	
500	4388	4,93	6,52	20,6	5,37	7,17	17,4	17,4	6,90	7,93	15,1	15,1	5,72	8,43	19,9	19,9	6,30	8,47	14,8	
795	4388	3,80	6,71	20,8	4,13	7,25	17,5	17,5	5,07	7,74	14,7	14,7	5,33	7,84	20,1	20,1	5,23	8,28	15,8	
980	4388	3,60	7,06	20,8	4,87	7,29	18,2	18,2	6,90	8,16	14,3	14,3	6,03	7,76	20,2	20,2	6,40	8,62	16,9	
1145	4388	3,53	6,91	20,8	3,87	7,10	18,2	18,2	5,27	8,16	13,9	13,9	5,57	7,29	20,15	20,15	5,13	8,43	17,5	
1500	4388	4,57	6,56	20,7	4,63	6,71	19	19	6,17	7,59	13,2	13,2	5,98	6,75	19,95	19,95	6,30	8,05	16,8	
500	4638	4,03	6,56	20,6	4,57	6,79	18,5	18,5	6,27	7,55	15,1	15,1	5,60	6,75	19,85	19,85	5,93	8,16	14,6	
795	4638	2,90	6,56	20,8	3,70	6,79	18,4	18,4	4,03	7,67	15	15	4,07	7,00	20,05	20,05	4,60	8,01	14,7	
980	4638	4,00	7,02	20,8	4,87	7,25	18,4	18,4	5,93	7,51	14,6	14,6	5,47	7,17	20,1	20,1	5,60	8,77	16	
1145	4638	3,13	6,68	20,7	3,60	6,94	18,5	18,5	4,77	8,20	14,1	14,1	4,62	7,13	20,05	20,05	4,70	8,32	17,2	
1500	4638	3,53	6,71	20,5	3,30	7,17	18,4	18,4	5,20	7,59	14,1	14,1	5,30	6,26	19,85	19,85	4,40	8,66	17	
Moyenne		3,71	6,67	4,13	7,00	5,53	7,95	5,26	7,36	5,54	8,35									

La Figure 75 et la Figure 76 montrent les tendances observées entre les valeurs de constantes diélectrique ME4 et P, respectivement pour l'ensemble des points de mesures (29 points par jour de mesure, total de 145 points) et seulement les valeurs moyennes. Il est constaté qu'il existe une corrélation raisonnable entre la lecture obtenue pour les deux appareils de mesure dans le contexte de la planche expérimentale. En considérant l'ensemble des points, une plus grande dispersion est constatée, notamment parce qu'il existe une variabilité spatiale significative du pourcentage de vides. L'effet du passage des roues dans les axes 1 et 2, créant une surface plus fermée, a aussi pu être constatée. En effet, pour chaque ligne transversale de mesure (Y=3000, 3638, 3888, 4138, 4388, 4638 mm), une valeur moyenne peut être calculée des 5 points de mesure en X, incluant les valeurs dans l'axe 1 et dans l'axe 2. Il est constaté que la valeur obtenue dans l'axe 1 ou l'axe 2 le long d'une ligne de mesure en X (transversal) est pratiquement toujours inférieure à la moyenne obtenue pour une ligne transversale Y. C'est le cas pour 59 cas sur 60 (2 axes, 6 lignes et 5 dates de mesures). La valeur moyenne dans les axes de roue est en moyenne égale à 0,88 fois la valeur moyenne pour une condition d'essai.

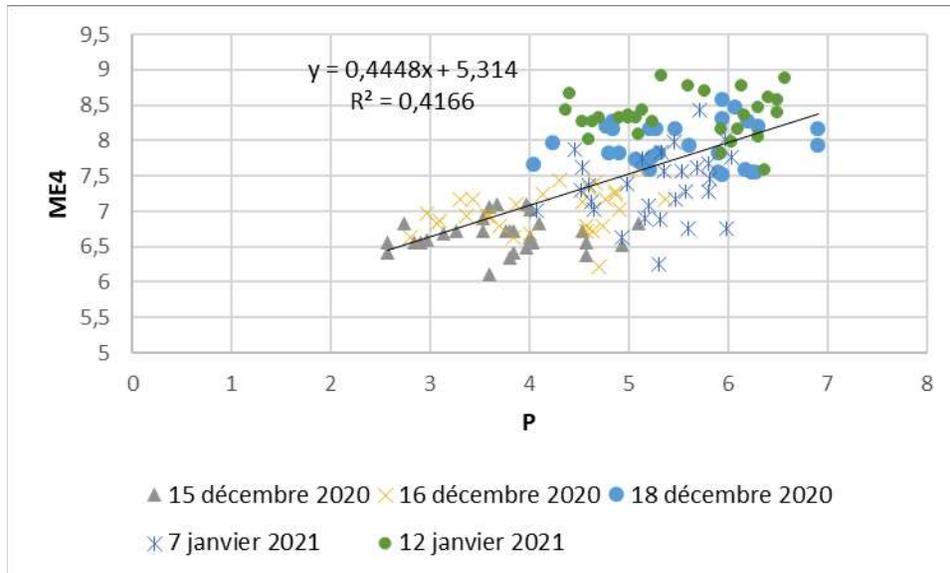


Figure 75. Relation entre les valeurs P et les valeurs ME4 sur la planche expérimentale

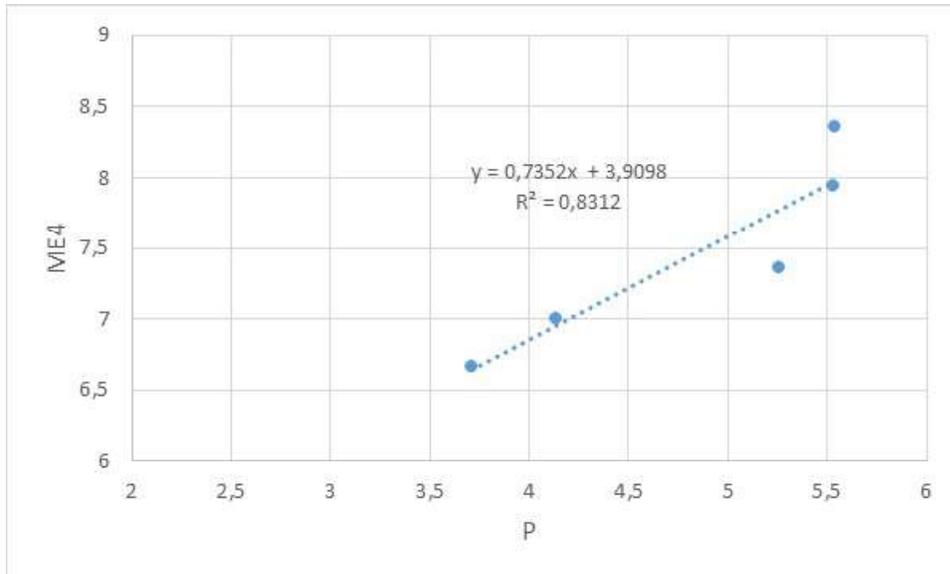


Figure 76. Relation entre les valeurs moyennes P et les valeurs moyennes ME4 sur la planche expérimentale

L'analyse de la relation entre les valeurs de constante diélectrique ME4 et P permet donc d'obtenir deux équations, soit

$$ME4 = a \times P + b = 0,4448 \times P + 5,314 \quad (11)$$

$$ME4 = a \times P + b = 0,7352 \times P + 3,9098 \quad (12)$$

Finalement, afin de prendre en considération la variabilité locale, la relation entre ME4 et P a été étudiée pour chacun des 29 emplacements de mesure. Un exemple est montré à la Figure 77 pour trois positions spatiales sur la planche expérimentale. Cette approche permet notamment d'obtenir les taux de variation (pente a de l'équation linéaire entre ME4 et P) pour chacun des 29 points de mesure. Le coefficient de détermination (R^2) moyen pour l'ensemble de ces régressions

linéaires est de 0,66 (écart-type de 0,23), ce qui montre un lien raisonnable entre ces deux variables analysées localement. Le taux de variation moyen (pente a de la régression) est de 0,633 (écart-type 0,198), ce qui concorde très bien avec les autres pentes identifiées.

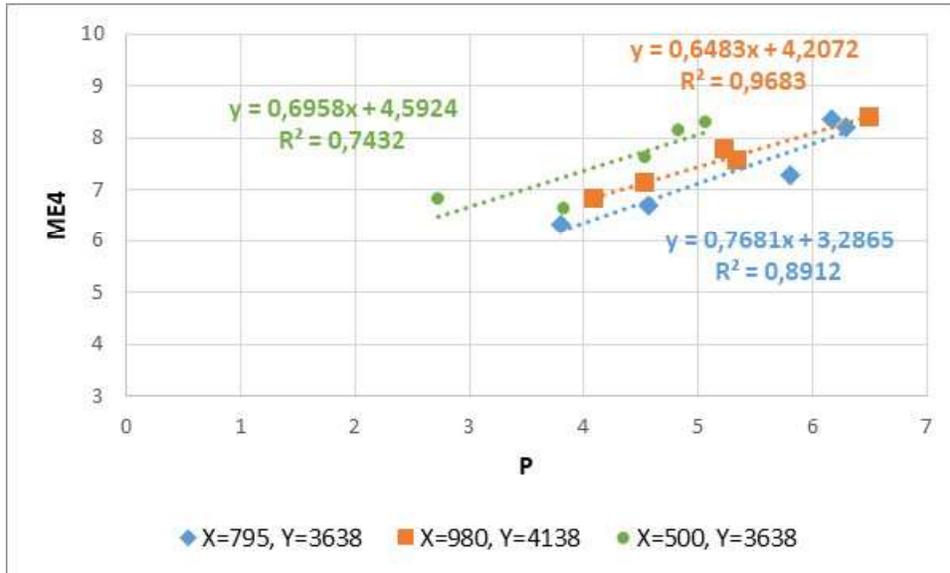


Figure 77. Exemples de corrélations basées sur l'approche locale par point de mesure

L'estimation du degré de saturation est basée sur le changement relatif (ΔP) de la valeur de la constante diélectrique P entre la condition initiale sèche ($Sr=0$) et chacune des autres conditions. Quatre approches sont étudiées :

- A – Équation 10 : conversion directe de ΔP en ΔSr en utilisant la pente de la relation linéaire,
- B – Équation 11 : conversion de ΔP en $\Delta ME4$, et $\Delta ME4$ en ΔSr ,
- C – Équation 12 : conversion de ΔP en $\Delta ME4$, et $\Delta ME4$ en ΔSr ,
- D - Taux de variation local : conversion de ΔP en $\Delta ME4$, et $\Delta ME4$ en ΔSr .

Afin de convertir une variation de la constante diélectrique ME4 en variation de degré de saturation, l'équation développée à l'Université Gustave Eiffel est utilisée. Cette approche utilise toutefois une double corrélation dans le contexte où le percomètre est utilisée pour les mesures sur la fosse expérimentale. Pour les fins exploratoires de cette partie du projet, les différentes possibilités de conversion et d'applicabilité des méthodes seront discutées. Néanmoins, pour la suite des analyses qui seront effectuées dans ce rapport, la conversion directe entre le percomètre et le degré de saturation, basée sur la calibration de laboratoire, sera utilisée. L'équation 13 reliant la valeur ME4 au degré de saturation a été définie en laboratoire sur les mêmes matériaux que ceux utilisés sur la planche expérimentale et pour des conditions similaires de pourcentage de vides. Elle est définie par

$$Sr = \alpha \times ME4 + \beta = 51,965 \times ME4 - 254,795 \quad (13)$$

dans laquelle α et β sont la pente et l'ordonnée à l'origine.

Pour les approches de conversion B, C et D, la valeur de ΔSr est déterminée pour chacun des 29 points de mesure et chacune des journées de mesures en utilisant l'équation

$$\Delta Sr = \alpha \times \Delta P \quad (14)$$

La valeur moyenne du Sr obtenue à partir des 29 points a été estimée selon les quatre méthodes par le biais du calcul de ΔP . Les résultats sont présentés au *Tableau 13* et à la *Figure 78*. La magnitude de la valeur du Sr estimé est directement fonction de la grandeur des taux de variation (pente) associées à la méthode considérée. Les Sr les plus élevés et les plus faibles sont obtenus avec la méthode A et la méthode C, respectivement. Globalement, bien qu'une variabilité non négligeable soit observée entre les méthodes, les résultats tendent à confirmer qu'il est possible

d'augmenter significativement le degré de saturation de la couche de surface jusqu'à un niveau suffisant par rapport à l'objectif initial, qui était d'obtenir un degré de saturation aux alentours de 50 %. Finalement, il doit être souligné que, tel qu'il a été discuté précédemment, les valeurs de P sont toujours plus faibles dans les axes des roues, aux endroits où se trouvent les jauges TML; un facteur moyen de 0,88 est identifié entre les mesures dans les sentiers de roue et à l'extérieur de celui-ci. Ce facteur influence les valeurs du degré de saturation.

Tableau 13. Valeurs moyennes de Sr obtenues selon les quatre approches considérées

	ΔP	A*	B	C	D	Moyenne
15-déc-20	0	0	0	0	0	0
16-déc-20	0,421	19,2	16,1	9,7	14,4	14,9
18-déc-20	1,820	83,2	69,5	42,1	57,9	63,2
07-janv-21	1,547	70,8	59,1	35,8	49,1	53,7
12-janv-21	1,824	83,5	69,7	42,2	60,4	63,9

*La méthode A est retenue pour la suite du rapport

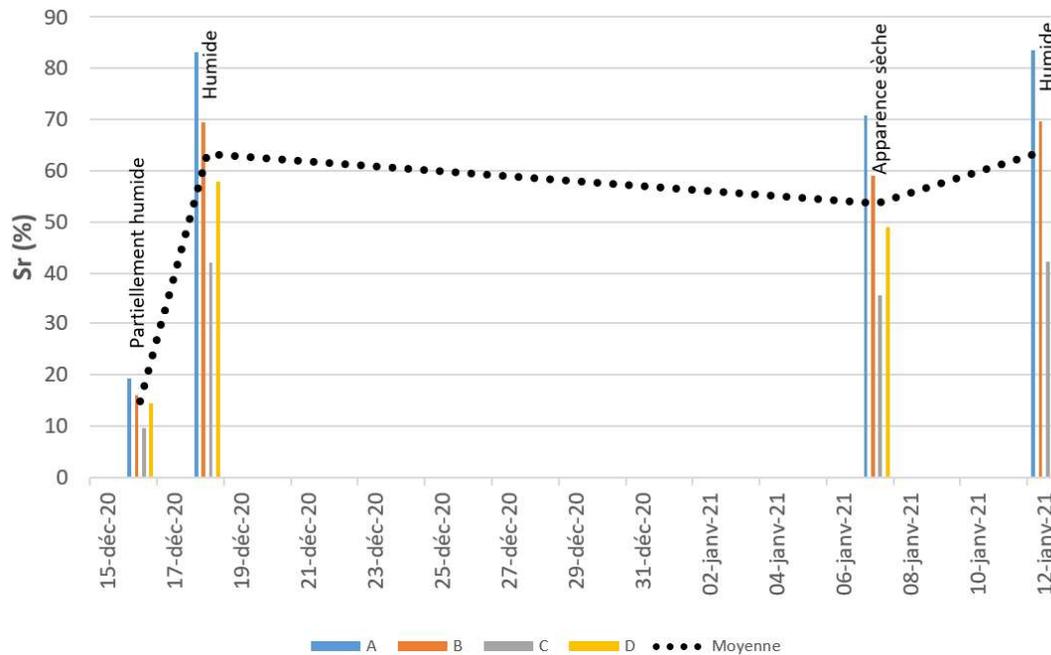


Figure 78. Valeurs moyennes de Sr obtenues selon les quatre approches considérées

L'objectif de cette étude sur l'estimation de la teneur en eau dans la couche de surface de ESG10 était notamment de vérifier l'applicabilité des deux techniques de mesures identifiées, en utilisant différentes techniques d'analyse. Les résultats pourront notamment être utiles pour la poursuite des travaux de laboratoire à l'Université Gustave Eiffel. Tel que discuté, pour la suite des analyses sur la planche d'essai, afin d'éviter l'utilisation d'une double corrélation et des imprécisions pouvant en découler, la corrélation directe entre les lectures au percomètre et le degré de saturation établie à partir de la calibration en laboratoire sera utilisée.

11.4 Suivi de la teneur en eau dans la couche de ESG10 durant l'essai

Pour la suite des essais selon la séquence méthodologique, le degré de saturation a été suivi avec le percomètre seulement. La relation directe entre les valeurs de ΔP et S_r obtenue de la calibration de laboratoire est utilisée (10). Les mesures en conditions humides ont été effectuées durant la Mégaphase G. Celle-ci inclut des mesures sous cycles thermiques seulement, ainsi sous cycles thermiques suivis de chargements mécaniques pour quantifier la réponse de la chaussée pour diverses conditions. L'essai de chargement accéléré thermo-mécanique a également été effectué en conditions humides. Pour l'ensemble de ces essais, la chaussée a été conservée en conditions humides. Pour ce faire, la chaussée a été arrosée sur une base journalière pour toutes les phases de la séquence méthodologique où la température étaient supérieure à 0 °C. Comme il a été montré que la teneur en eau dans la couche de ESG10 varie peu en fonction du temps une fois qu'elle a été humidifiée, des contrôles du degré de saturation au percomètre ont été effectués deux fois, la première suite aux essais de type réponse (cycles thermiques et réponse pour différentes températures) (11 février 2021), et la deuxième à la fin de l'essai de chargement accéléré (9 avril 2021).

La *Figure 79* présente l'ensemble des mesures du degré de saturation moyen à partir de la première mise en eau au mois de décembre 2020. Il est possible de constater que, suite aux phases intensives d'augmentation du degré de saturation du 18 décembre et du 7 janvier où le bassin a été rempli et le chariot a été utilisé avec les contreplaqués, il a été possible maintenir un

degré de saturation assez élevé sur une longue période de temps. Les phases de saturation avec le bassin ont permis d'obtenir un degré de saturation moyen estimé à 80%. En humidifiant régulièrement la chaussée à chaque moment où la température passait au-dessus de 0 °C, il est constaté que le degré de saturation diminue lentement à long terme, mais demeure significativement au-dessus de l'objectif de 50%. Suite aux essais de types réponse et avant l'essai de chargement accéléré, le degré de saturation moyen a été estimé à 71 %. À la fin de l'essai de chargement accéléré, une valeur moyenne de 64 % a été obtenue.

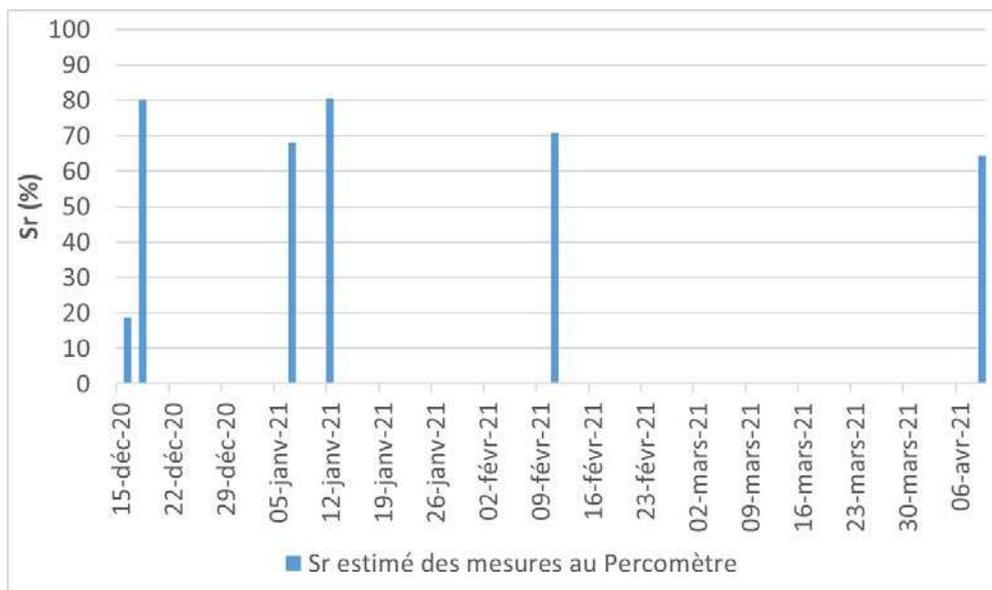


Figure 79. Suivi de la teneur en eau moyenne dans la couche de ESG10 durant la séquence méthodologique

11.5 Suivi de la teneur en eau dans les couches non liées et dans le sol d'infrastructure durant l'essai

La teneur en eau dans l'ensemble de la chaussée a principalement été suivie avec la sonde multiniveaux ProfileProbe (PR6) décrite précédemment dans le rapport. D'autres capteurs (Decagon EC5) ont aussi été insérés dans la fondation, près des bordures latérales, afin de juger

de l'infiltration d'eau appliquée en surface dans le corps de la chaussée. La *Figure 80* présente un rappel de la position en plan X-Y des différents capteurs de teneur en eau.

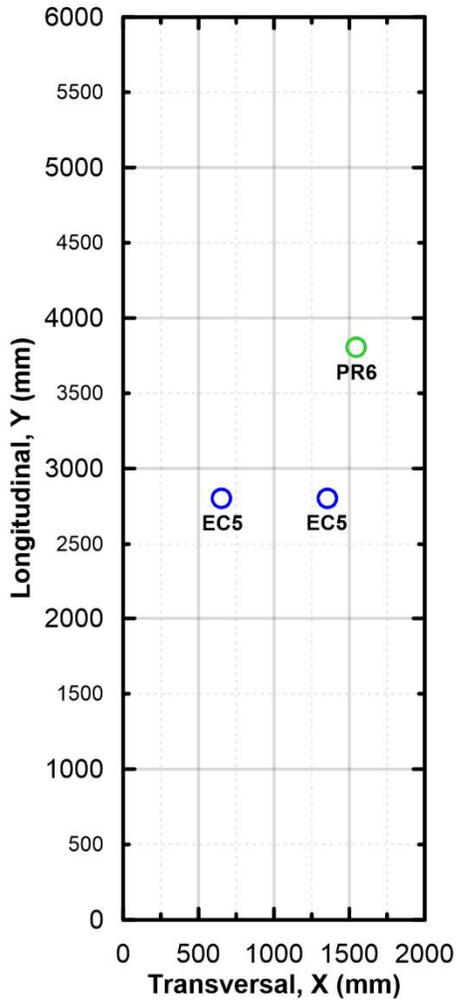


Figure 80. Position en plan des jauges de teneur en eau (rappel)

Les capteurs EC-5 ont principalement été utilisés pour l'étude à court terme de la variation de la teneur en eau volumétrique dans la fondation, près des bordures, lors des phases de saturation avec le bassin rempli d'eau. Tel que présenté à la *Figure 81*, qui montre le cycle de saturation utilisant le bassin du 8 au 12 janvier, la teneur en eau volumétrique augmente avec le remplissage du bassin. Les variations observées correspondent aux divers moments, environ chaque 24 h, où le niveau d'eau est réajusté à la hausse dans le bassin. Les variations à la baisse du niveau d'eau dans le bassin sont attribuables à l'évaporation, à la saturation des vides interstitiels de l'enrobé de surface, mais aussi à l'infiltration dans la chaussée. En 24h, une baisse d'environ 25 mm était

observée, ce qui correspond à une perte d'environ 0,25 m³ ou 250 L. Des fuites près des joints sont fort probablement responsables d'une partie de cette infiltration. Le cas échéant, une portion de l'eau infiltrée est interceptée par les géotextiles latéraux et dirigée vers la nappe phréatique. Néanmoins, comme cette possibilité a grandement été atténuée lors des travaux visant à améliorer l'étanchéité, il est probable qu'une partie de l'infiltration soit aussi attribuable à une circulation directe à travers la couche de ESG10 et de la couche de GB20.

Deux autres aspects doivent aussi être notés. Premièrement, il doit être souligné qu'aucun signe de fuite n'a été observé au point d'insertion de l'accéléromètre, du déflectomètre de surface et de la sonde PR6. Deuxièmement, le niveau de la nappe phréatique est ajusté automatiquement par un système électronique. Lorsque de l'eau s'infiltrait dans la chaussée, plusieurs phases de compensation du niveau de la nappe ont été observées avec le système de contrôle, ce qui montrait qu'une partie de l'eau mise en surface migrait ou s'infiltrait dans la chaussée.

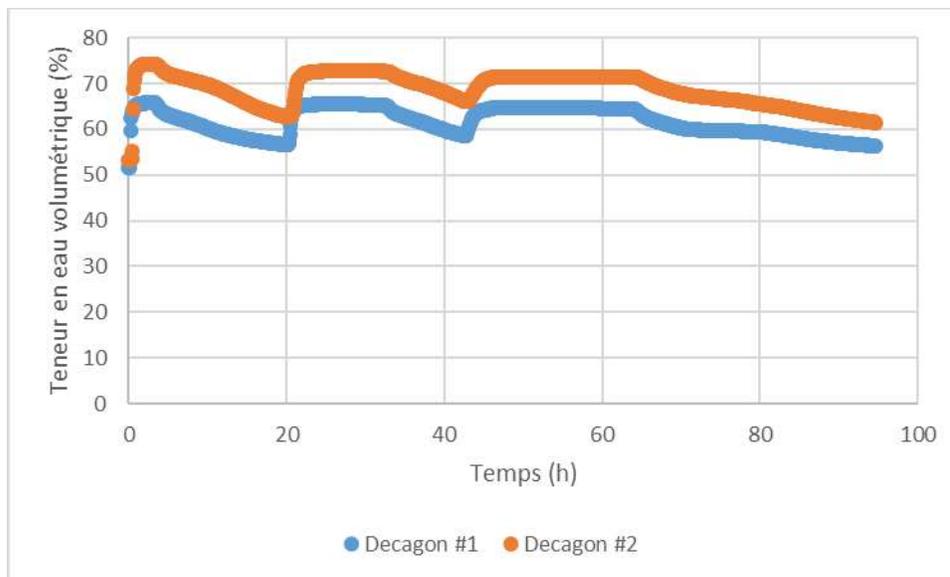


Figure 81. Valeurs de teneur en eau volumétrique mesurées avec les sondes EC-5 (Decagon) – Cycle de saturation du 8 au 12 janvier 2021

La *Figure 82* présente des valeurs de teneur en eau mesurées avec la sonde PR6 à différents moments durant la séquence méthodologique. Les profondeurs présentées correspondent au bas de la fondation ($Z=-350$ mm), aux parties supérieures et inférieures de la sous-fondation ($Z=-450$ et -750 mm), ainsi qu'à environ 300 mm dans le sol d'infrastructure ($Z=-1150$ mm). Il est notamment possible d'observer l'effet des deux phases d'inondations du bassin (16 décembre 2020 et 12 janvier 2021) sur la teneur en eau volumétrique dans les matériaux de chaussée. Après le 12 janvier, le bassin n'a plus été utilisé puisque des passages de roues devaient être appliqués; la chaussée a seulement été humidifiée régulièrement en surface. Il est constaté que l'effet d'ajout d'eau en surface à divers moments durant la séquence est beaucoup moins marqué, sinon difficilement perceptible, en comparaison avec les périodes où le bassin a été utilisé. De façon générale, la teneur en eau dans les couches granulaires et dans le sol a changé suite aux essais et aux phases de saturation effectués sur la surface du ESG10 avec le bassin. En excluant la période de rodage entre le 16 décembre 2020 et le 12 janvier, le *Tableau 14* permet de constater que les conditions de teneur en eau volumétrique ont changé entre les Mégaphase A à F (conditions sèches) et la Mégaphase G (conditions humides de la couche de surface ESG10). Le pourcentage d'augmentation de la teneur en eau volumique varie entre 18 et 32 %, ce qui correspond à une variation modérée. En termes de degré de saturation (S_r), en appliquant les augmentations exprimées en pourcentage (*Tableau 14*) aux valeurs initiales obtenues lors de la mise en œuvre, le S_r du sol ($z=-1150$ mm) a augmenté de 50 à 66%, celui de la sous-fondation ($z-750$ mm) de 21% à 25% et celui de la fondation ($z=-350$ mm) de 34 à 40%. Il est attendu que cette plage de variation de la teneur en eau ait un effet peu marqué sur le comportement mécanique des matériaux granulaires et de la chaussée de façon générale.

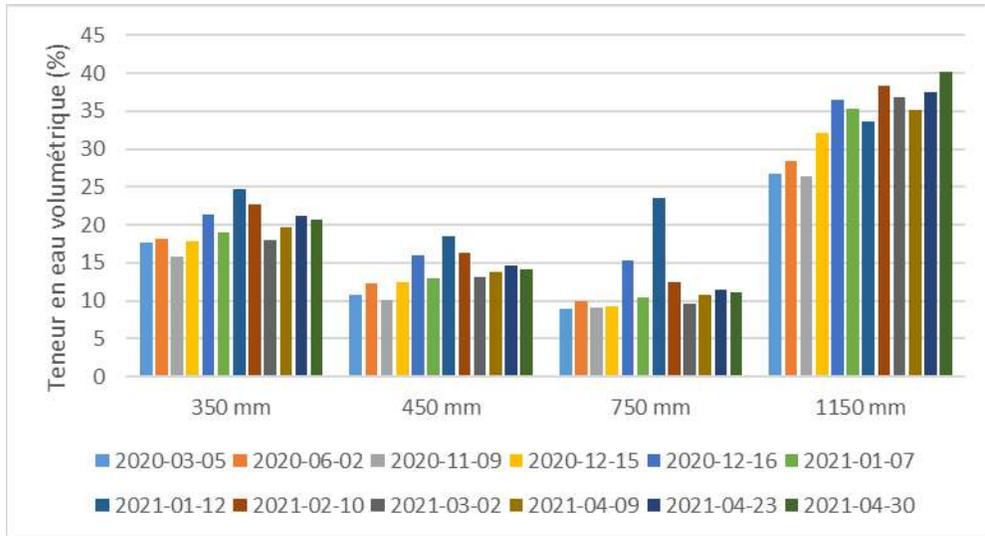


Figure 82. Valeurs de teneur en eau volumétrique mesurées avec la sonde PR6

Tableau 14. Teneur en eau volumétrique moyenne mesurée avec la sonde PR6 pour différentes profondeurs et différents moments dans la séquence méthodologique

	Z=-350 mm	Z=-450 mm	Z=-750 mm	Z=-1150 mm
Moyenne jusqu'au 15 décembre 2020	17,4	11,4	9,3	28,4
Moyenne après 12 janvier 2021	20,5	14,4	11,1	37,6
% d'augmentation (%)	18	26	19	32

12 Mégaphase G intermédiaire : Chargement mécanique en conditions mouillées ($T_{interface}=5^{\circ}\text{C}$)

Cet essai est effectué après la phase de mouillage et avant l'application des cycles de gel/dégel sur la structure de la chaussée. Un seul niveau de chargement est appliqué pendant cet essai ($Q=40\text{KN}$). Cet essai peut être comparé à l'essai D13 présenté en Section 0, effectué à même température et chargement mais sous condition de surface sèche. Il va aussi servir d'état de référence pour l'évaluation de l'effet des cycles de gel/dégel effectués par la suite sur la structure.

La Figure 83 montre que la température est redevenue positive sur toute l'épaisseur de la structure.

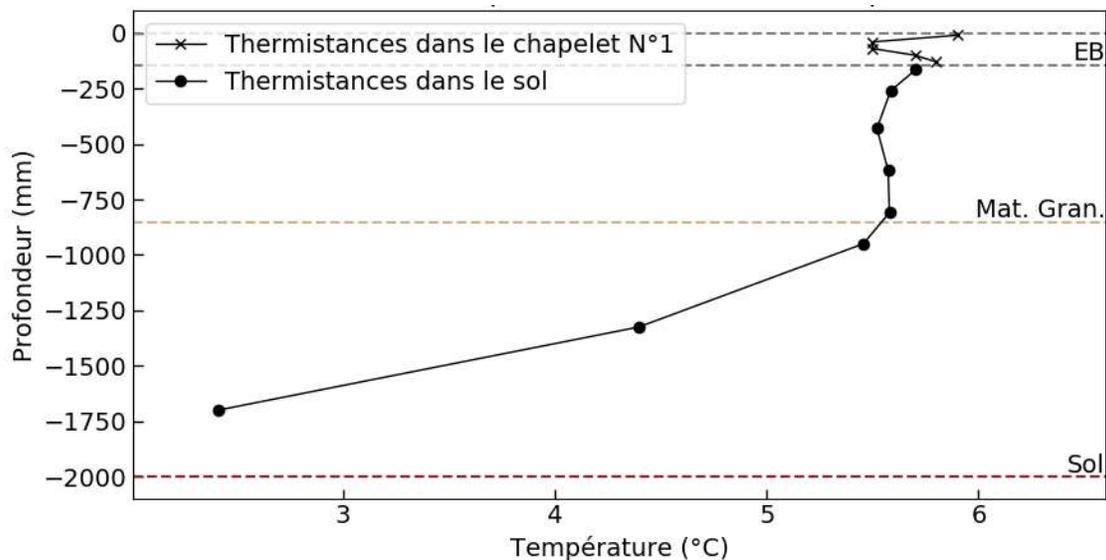


Figure 83: Profil de température dans la structure de chaussée au début de l'essai G_intermédiaire.

La déflexion mesurée (valeur maximale de 0.18 mm) par le capteur ancré est voisine de celle mesurée pendant l'essai D13.

Les figures suivantes juxtaposent les déformations longitudinale et transversale en bas de GB20, en bas de ESG10 et en haut de GB20 mesurées sous charge roulante au cours des essais D13 et

G_intermédiaire. On observe dans tous les cas des réponses similaires entre ces deux essais permettant de conclure à un effet quasi-négligeable de la présence d'eau liquide dans les couches d'EB sur la réponse de la structure, tout au moins pour le nombre de passage de charges effectué.

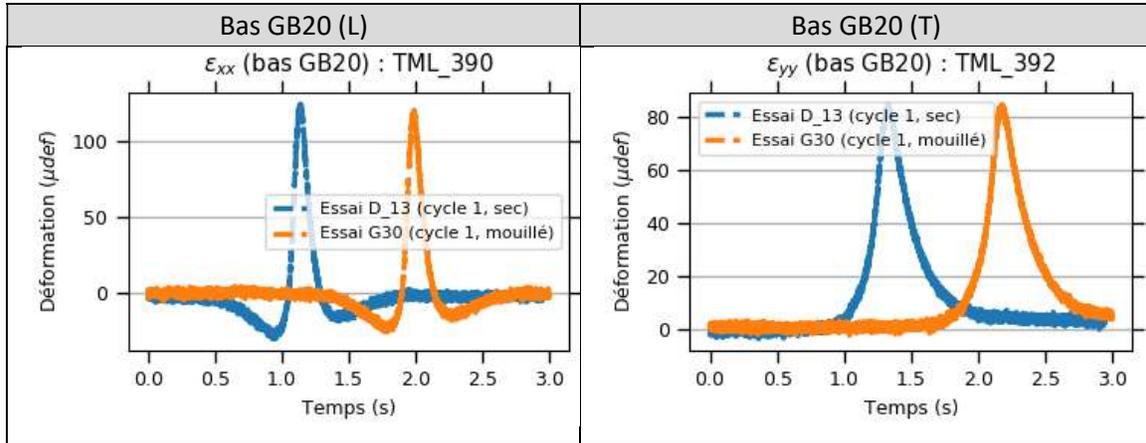


Figure 84 : Signaux de déformation longitudinale (TML_390) et transversale (TML_392) en bas de GB20 au passage de la charge roulante enregistrés lors des essais D13 (bleu) et G_intermédiaire (orange).

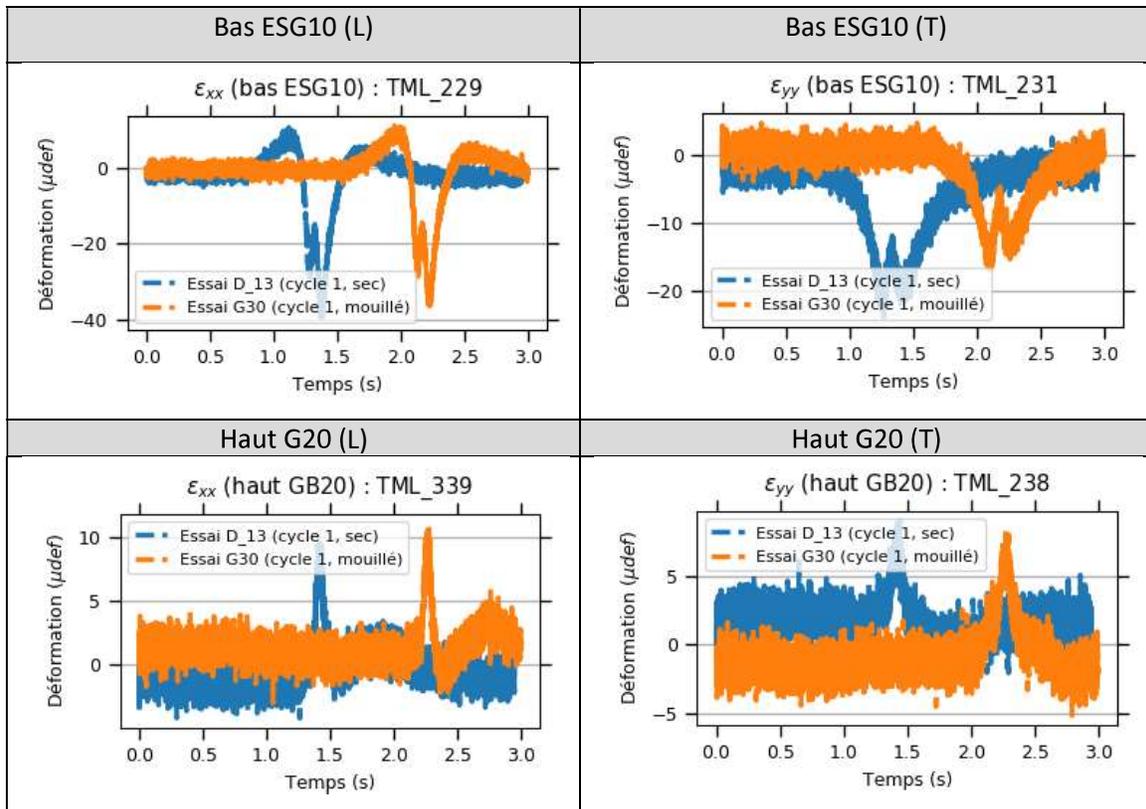


Figure 85 : Signaux de déformation longitudinale et transversale de part et d'autre de l'interface au passage de la charge roulant enregistrés au cours des essais D13 (bleu) et G_intermédiaire (orange).

13 Mégaphase G : Cycles de gel/dégel en condition humide (+5°C; -10°C;+5°C) sans chargement mécanique

Pendant cette phase d'essai, la surface de la chaussée est rendue humide et trois cycles thermiques de gel/dégel d'amplitude +5/-10/+5°C au niveau de l'interface ESG10/GB20 sont appliqués à la structure de chaussée. Rappelons que des cycles similaires ont été appliqués à la structure en condition sèche pendant la mégaphase B du protocole d'essais. La comparaison entre la réponse de la structure des mégaphases G et B va permettre de mettre en évidence les effets de changement de phase de l'eau porale sur la déformation de la structure.

13.1 Évolution de la température dans la chaussée pendant les cycles thermiques

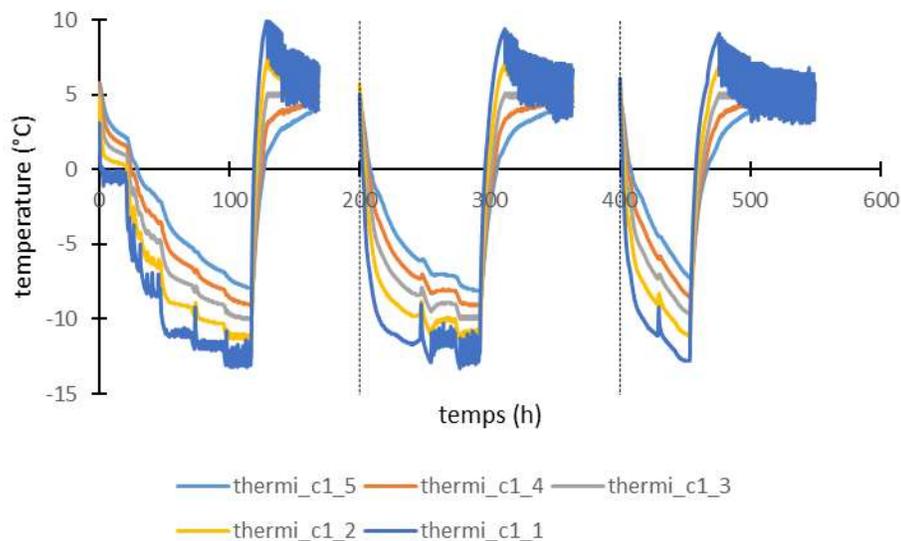


Figure 86 : évolution de la température au cours du temps pour les 3 cycles de gel-dégel en condition humide (mégaphase G, thermistances dans les EB chapelet C1)

La Figure 86 présente l'évolution des températures dans les enrobés pour les 3 cycles de gel-dégel de la mégaphase G, avec des offsets arbitraires sur le temps de 200h et 400h pour les cycles 2 et

3. L'asservissement en température est réalisé sur la température de l'interface ESG10/GB20 (thermi_c1_3) qui respecte précisément les variations entre +5°C, -10°C et +5°C sur chaque cycle. La thermistance proche de la surface (thermi_c1_1) subit en revanche les fluctuations de la température du générateur de froid. Un gradient thermique de l'ordre de 5°C s'instaure sur l'épaisseur des couches d'enrobé au cours des cycles, négatif en phase de descente en température (plus froid en haut qu'en bas) et positif en phase de remontée. À titre d'exemple, les figures ci-dessous montrent les profils verticaux de température dans la structure atteints à différents instants du cycle 1.

Profils verticaux de température dans la structure au cours du cycle #1 de gel/dégel

La Figure 87 indique sur la courbe de température d'interface ESG10/GB20 (thermi_c1_3) les instants du cycle 1 considérés pour le tracé des profils verticaux.

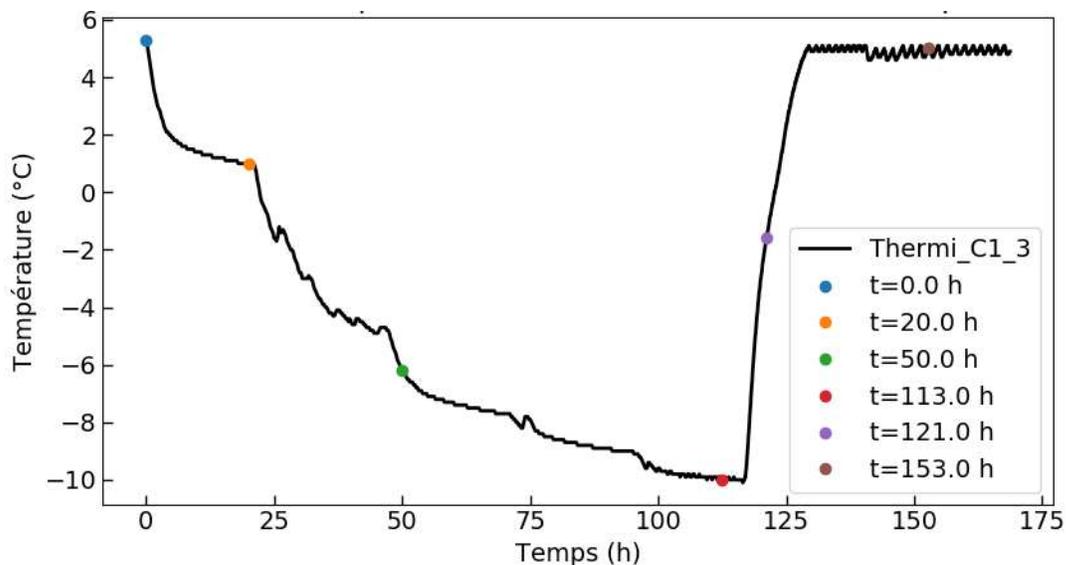


Figure 87 : Évolution de la température près de l'interface ESG10/GB20 pendant le cycle #1 de l'essai G.

Les Figure 88 et Figure 89 représentent ces profils dans les couches d'enrobé et les couches granulaires. On retrouve sur la Figure 88 les inversions de gradient en fonction des phases de descente et montée des températures du cycle. Les gradients extrêmes sont obtenus aux instants 50h (-7°C/120mm) et 121h (+8°C/120mm). La Figure 89 montre que la température à la base du

sol est maintenue constante environ égale à 2°C à travers le dispositif expérimental installé en fond de fosse. Le sol ($-2000\text{mm} < z \lesssim -800\text{mm}$) reste à température positive pendant tout le cycle. Les 50 premiers centimètres des couches granulaires ($-650\text{mm} \lesssim z < -140\text{mm}$) sont à température entièrement négative à 113h et reviennent à température positive en fin de dégel. Au début de l'essai ($t = 0\text{h}$), la température mesurée près de la surface de la chaussée est égale à +5°C. Dans la profondeur, cette température diminue jusqu'à atteindre une valeur de 2.5°C à la base de la structure ($Z=-1700\text{ mm}$).

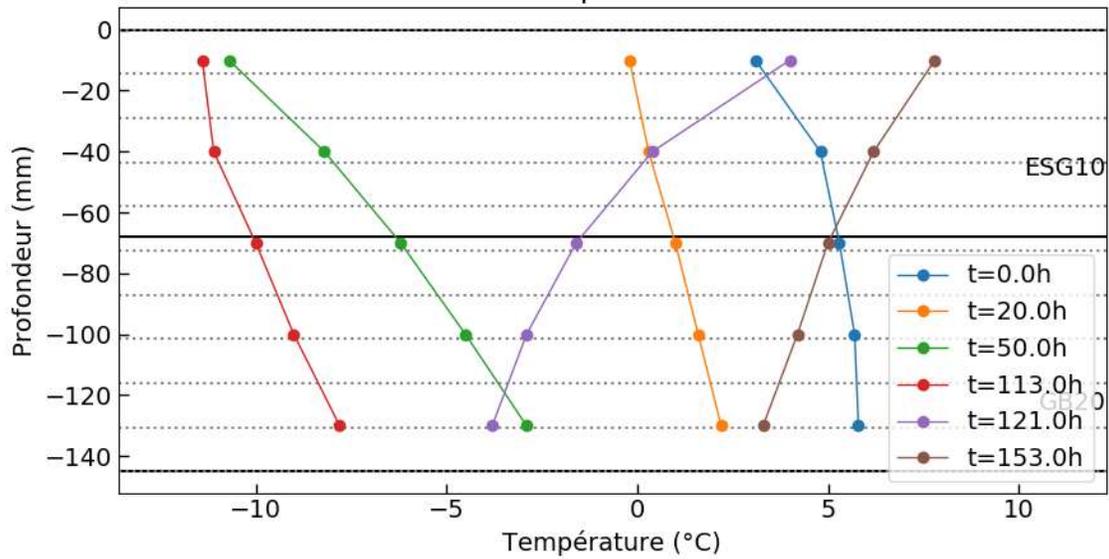


Figure 88 : Profils de température enregistrés dans l'EB à différents instants du premier cycle de l'essai G.

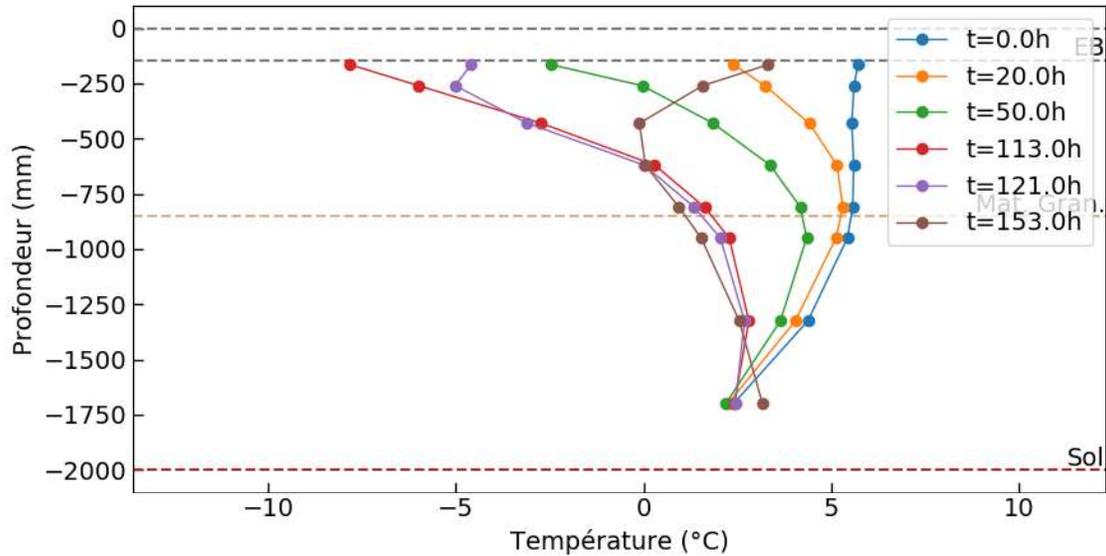


Figure 89 : Profils de température enregistrés dans les couches non-bitumineuses à différents instants du premier cycle de l'essai G.

13.2 Vue d'ensemble des déformations dans les couches d'enrobé pendant les trois cycles de gel/dégel

Les figures ci-dessous présentent les déformations relevées en bas d'ESG10 et en bas de GB20 au cours des 3 cycles de gel/dégel de la mégaphase G et la comparaison avec le cycle 2 à sec de la mégaphase B. Les déformations sont réinitialisées à zéro au début de chaque cycle. À noter la différence d'échelle de déformation entre les mesures longitudinale et transversale qui ne présentent pas les mêmes amplitudes comme déjà évoqué pour la mégaphase B. Nous discutons dans la suite les principaux effets mis en évidence par ces mesures, spécifiquement induits par la présence d'eau et le gel/dégel.

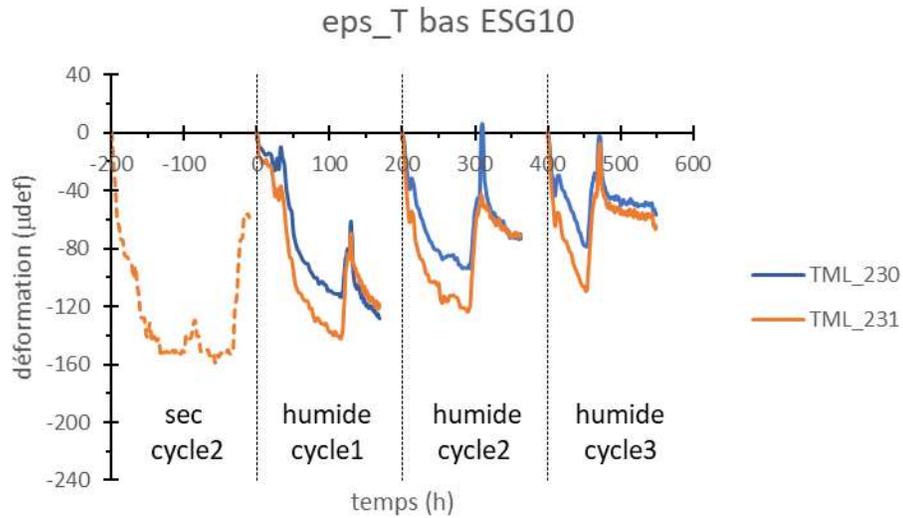


Figure 90 : déformation transversale en bas d'ESG10 (TML_230 et 231) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.

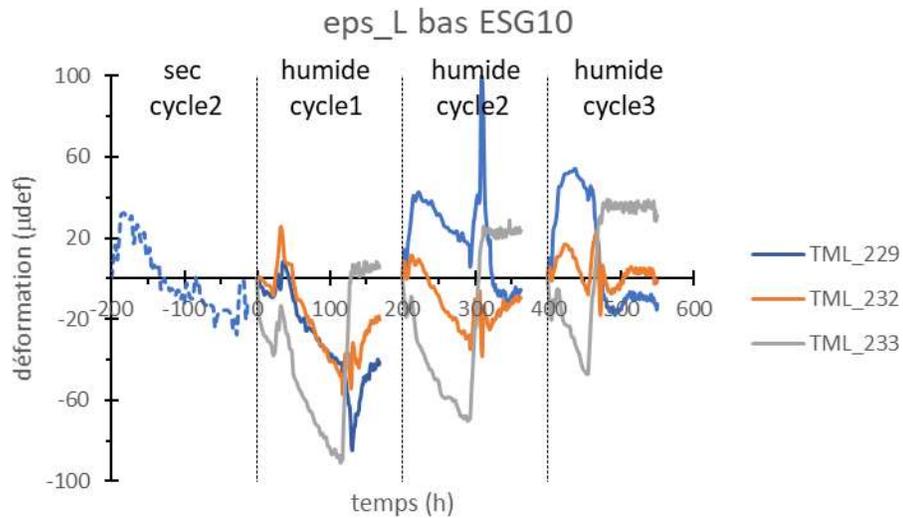


Figure 91: déformation longitudinale en bas d'ESG10 (TML_229, 232 et 233) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.

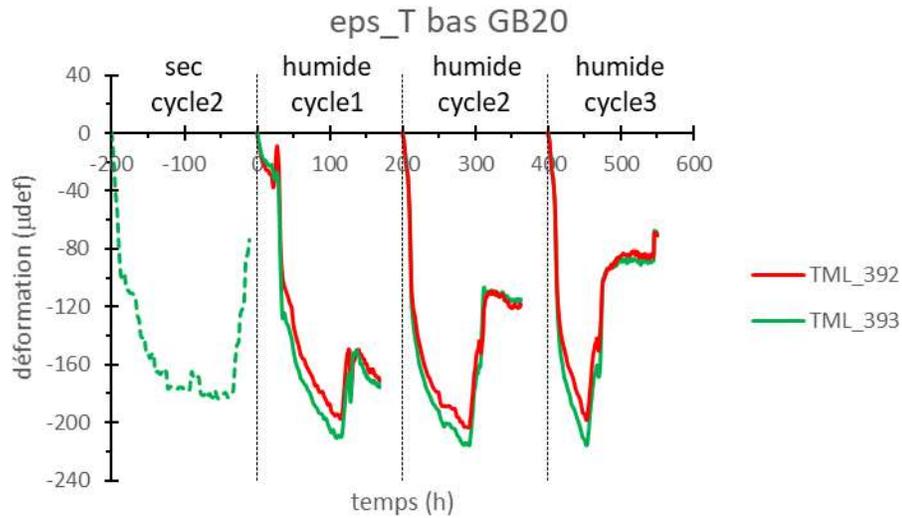


Figure 92: déformation transversale en bas de GB20 (TML_392 et 393) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.

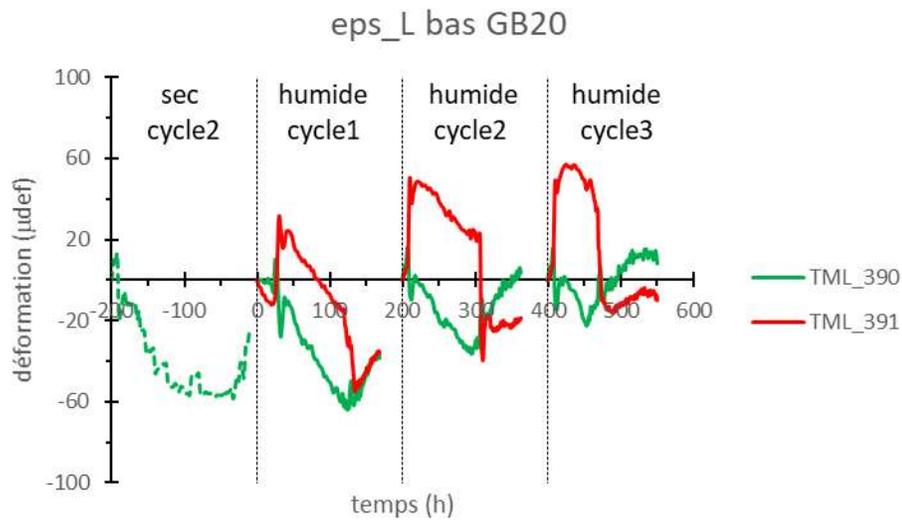


Figure 93: déformation longitudinale en bas de GB20 (TML_390 et 391) pour les trois cycles de la mégaphase G. Comparaison avec le cycle 2 de la mégaphase B à sec.

13.3 Effets de l'eau et du gel sur les déformations en bas d'ESG10 et de GB20

Dans cette section, nous nous intéressons plus spécialement aux déformations longitudinales et transversales en bas d'ESG10 et de GB20 mesurées par les jauges TML représentées sur la Figure 94 en vue de dessus pour la demi planche d'essai. Celles-ci se présentent sous forme de couples « bas d'ESG10-bas GB20 » situés sur une même verticale, hormis pour la TML_233 qui n'est pas réexploitée ici.

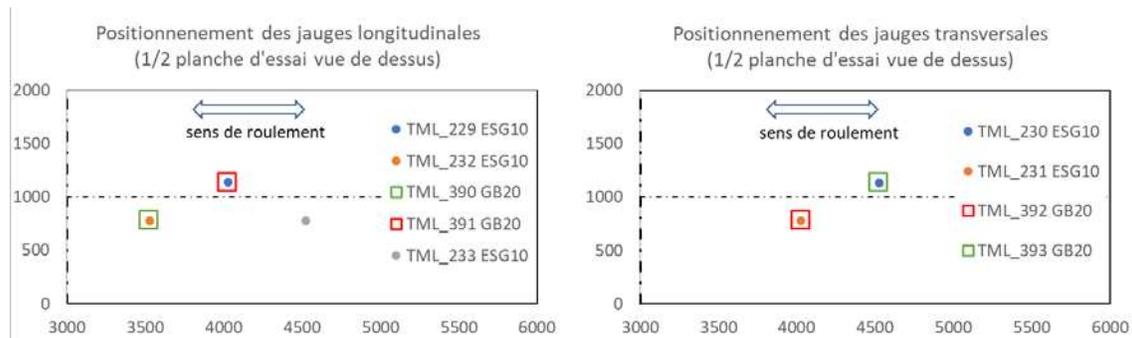


Figure 94 : Positionnement des jauges longitudinales et transversales en bas des couches d'ESG10 et de GB20

La Figure 95 rassemble les déformations transversales mesurées pour les 3 cycles en conditions sèche et humide. On constate sur la Figure 95(b) une assez bonne similitude des réponses des couples (TML_231;TML_392) et (TML_230;TML_393) et une bonne répétition entre les 3 cycles. La structure paraît donc assez homogène sur la zone concernée et sans évolution notable au cours des 3 cycles. Par contre, on constate pour ces cycles une différenciation marquée entre les déformations en bas d'ESG10 et de GB20 qui n'existait pas à sec. On verra plus loin à l'aide des modélisations que cet effet peut être retrouvé en diminuant le freinage entre les couches d'EB dans la direction transversale et en tenant compte de la déformation de gonflement liée au gel dans l'ESG10.

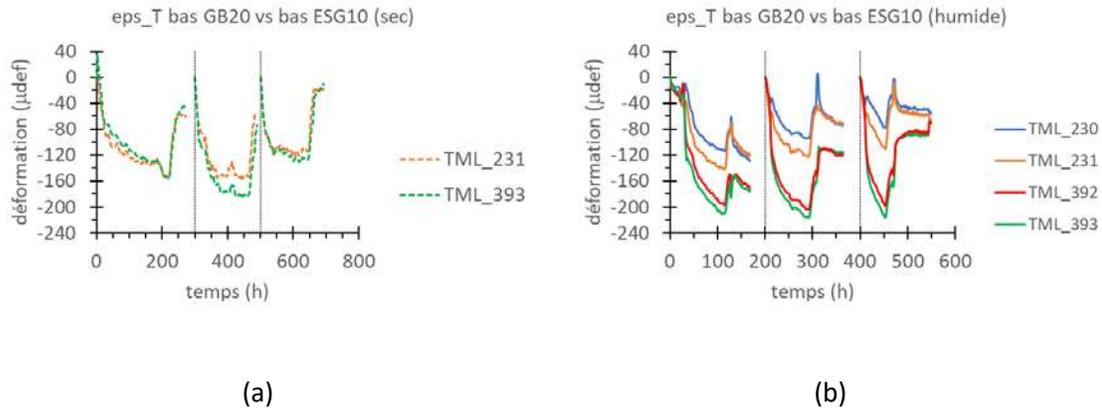


Figure 95 : Comparaison sec (a) et humide (b) des déformations transversales en bas d'ESG10 et de GB20. Mise en évidence d'une différenciation significative des évolutions entre couches en présence d'eau et de gel.

La Figure 96 rassemble les résultats des jauges longitudinales. Elles sont d'amplitude plus faible que les déformations transversales mais restent néanmoins significatives vis-à-vis des effets montrés, compte tenu de la précision de ces jauges. La Figure 96(b) montre ici un écart « évolutif » de déformation entre les 2 couples de jauges (TML_232;TML_390) et (TML_229;TML_391). Au cours du premier cycle humide, les réponses des 4 jauges sont proches les unes des autres et également de celles obtenues en condition sèche. Au cours du second cycle, un écart marqué apparaît entre les 2 couples de jauges sus mentionnés, traduisant l'apparition d'une hétérogénéité locale du comportement de la structure. On observe en particulier un pic d'extension important sur la jauge TML_229 au moment du dégel. Au cours du 3eme cycle, un écart de réponse subsiste entre les 2 couples de jauges. Par contre, le pic de la TML_229 a disparu et les déformations du couple (TML_229; TML_391) se superposent. De manière générale, on constate d'ailleurs que les déformations en bas d'ESG10 et de GB20 sur une même verticale (pour un couple de TML donné) sont très proches l'une de l'autre. Sur la base des modélisations, on verra qu'il faut conserver, comme dans le cas sec, des conditions de fretage longitudinal fortes à la base du GB20 et entre les couches d'enrobé pour avoir des déformations de faible amplitude et quasi-identiques entre bas d'ESG10 et bas de GB20. Les écarts entre les couples de jauges ainsi que le pic de la TML_229 pourraient être expliqués quant à eux par l'apparition de fissures verticales transversales localisées au voisinage du couple de jauges (TML_229;TML_391).

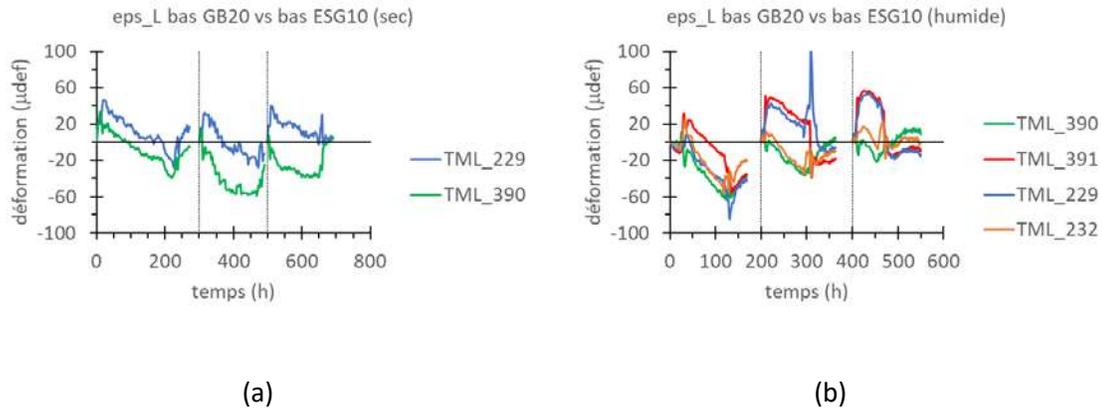


Figure 96 : Comparaison sec/humide des déformations longitudinales en bas d’ESG10 (TML_229 et 232) et de GB20 (TML_390 et 391). Les jauges TML_232 et 390 sont situées aux mêmes coordonnées (x,y), idem pour TML_229 et 391.

13.4 Premières modélisations et comparaison avec les résultats d’essais

Les calculs réalisés ici reprennent les principaux éléments des simulations effectuées dans la thèse de V.T Vu pour rendre compte des effets de gel/dégel sur éprouvettes d’enrobé partiellement saturées, testées en laboratoire (V. T. Vu et al., 2020; Van Thang Vu, 2017; Van Thang Vu et al., 2018)⁷. Ils ont été effectués ici par éléments finis 3D en négligeant les aspects viscoélastiques afin d’alléger les temps de calcul et favoriser la réalisation d’études paramétriques. De nombreuses modélisations thermo-élastiques avec chargement thermique et déformation de gonflement (ϵ_g), due à la formation de glace dans les pores de l’ESG10, ont ainsi pu être effectuées pour tenter de retrouver les principales observations faites sur les cycles de gel/dégel de la phase G. Au cours de ces calculs, on a fait varier :

- Les conditions de frettage en bas de GB20

⁷ Vu, V. T., O. Chupin, J. M. Piau, and F. Hammoum. 2020. “Finite Element Modelling of Partially Saturated Asphalt Specimens Subjected to Frost—towards an Explanation of Winter Potholes.” *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1843036>.

Vu, Van Thang. 2017. “Etude Expérimentale et Numérique Du Comportement Au Gel et Au Dégel Des Enrobés Bitumineux Partiellement Saturés.” Thesis (PhD), Ecole Centrale Nantes, France.

Vu, Van Thang, Olivier Chupin, Jean Michel Piau, Ferhat Hammoum, and Stephane Bouron. 2018. “Experimental Study and Modeling of the Behavior of Partially Saturated Asphalt Concrete under Freezing Condition.” *Construction and Building Materials* 163: 169–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.070>.

- Les conditions de frettage entre couches d'enrobés
- L'amplitude de la déformation de gonflement, ε_g

Par ailleurs, on a également étudié divers scénarios d'endommagement pour rendre compte des évolutions de déformations plus locales observées notamment sur la jauge TML_229 après le premier cycle de gel/dégel. Ceux-ci ne sont toutefois pas détaillés dans la suite, faute de conclusion définitive à ce jour.

Dans la suite, on relate succinctement le cheminement de l'analyse proposée pour expliquer les divers résultats de mesures.

Par rapport aux calculs présentés en mégaphase B, nous avons préalablement effectué quelques adaptations des scripts Freefem++ et du maillage EF 3D de la structure afin d'introduire des conditions de frettage entre ESG10 et GB20 et des zones d'endommagement potentiel de faible épaisseur dans le sens transversal. Pour ce faire, les couches d'ESG10 et GB20 ont fait l'objet de deux maillages distincts raccordés au niveau des couples de nœuds situés à l'interface par des ressorts indépendants agissant dans les trois directions (x, y, z). Ce type de modélisation permet d'introduire à la limite des zones de délaminage en supprimant toute rigidité entre nœuds d'interface en vis-à-vis.

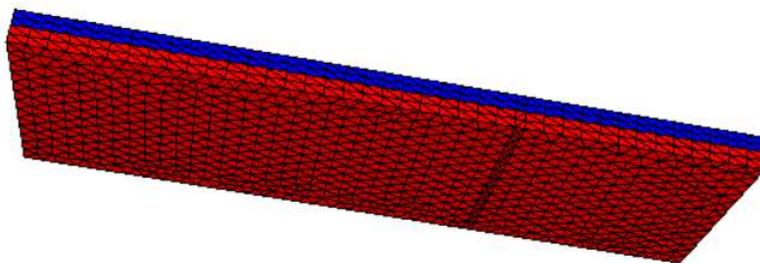


Figure 97 : maillage des couches d'ESG10 et GB20 avec surface double au niveau de l'interface et ressorts nodaux dans les 3 directions

Le jeu de donnée utilisé pour la mégaphase B (cycles secs avec chargement thermique) a été légèrement adapté pour tenir compte de ces modifications du modèle EF et sert de point de départ à l'étude qui suit (Tableau 15). Parmi les principaux points à noter, il y a notamment : a) la

condition de contact verticale entre GB20 et sol est modélisée par des ressorts de Winkler « verticaux » de rigidité K_{sol} , b) la condition de frottement entre GB20 et sol est modélisée par des ressorts « horizontaux » de rigidités surfaciques $K_{sol} \times \text{fret}_L^{\text{sol}}$ et $K_{sol} \times \text{fret}_T^{\text{sol}}$, c) le contact entre les couches d'enrobé est assuré par une première famille de ressorts verticaux, d) la condition de frottement entre ESG10 et GB20 est modélisée par des ressorts nodaux « horizontaux » de rigidités respectives $K_{\text{fret}}^{\text{EB}}$, e) les valeurs de rigidité de l'ensemble de ces ressorts sont prises élevées dans le cas sec pour assurer un collage parfait entre couches d'enrobé. Les conditions limites en température considérées dans ces calculs sont affichées sur la Figure 99. Les cycles sont ramenés à 12 pas de temps. La loi de comportement tensorielle de l'ESG10 humide est prise sous la forme additive suivante des différentes sources de déformation :

$$\varepsilon = \underbrace{\frac{1+\nu}{E}\sigma - \frac{\nu}{E}\text{tr}(\sigma)I}_{\text{déformation élastique}} + \underbrace{\alpha(\theta - \theta_0)I}_{\text{dilatation thermique}} + \underbrace{\varepsilon_g(w)(h(\theta) - h(\theta_0))I}_{\text{déformation de gonflement liée au gel}} \quad (15)$$

avec $\varepsilon_g(w)$ = amplitude de déformation de gonflement fonction de la teneur en eau, w , de l'enrobé, $h(\theta)$ = fonction de pondération du gonflement en fonction de la température θ (Figure 98). θ_0 est la température initiale au point considéré. Le terme $h(\theta_0)$ permet de partir dans les calculs de champs de déformation et de contrainte nuls à l'instant initial.

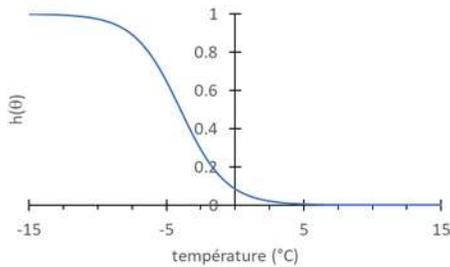


Figure 98 : fonction de pondération du gonflement $h(\theta)$

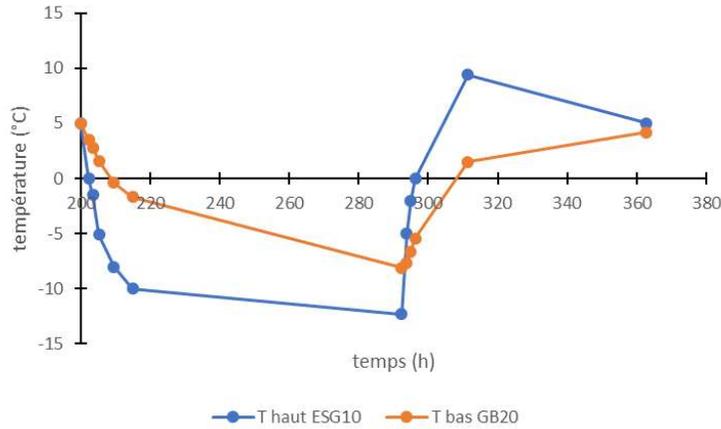


Figure 99 : Conditions aux limites en température des calculs EF 3D

Tableau 15 : Paramètres de modélisation du calcul EF 3D en condition sèche.

E_{ESG10} (MPa)	E_{GB20} (MPa)	K_{sol} (MPa/mm)	$fret_L^{sol}$	$fret_T^{sol}$	K_{fret}^{EB}	ε_g
1700	1900	1.2	0.75	0.75	$+\infty$	0

Par la suite, on présente les déformations longitudinales et transversales en bas d'ESG10 et de GB20, calculées dans la zone de positionnement des jauges TML au voisinage des TML_229 et TML_391. On va montrer que les courbes expérimentales peuvent être convenablement retrouvées en combinant quatre effets en sus de la modélisation en condition sèche : l'introduction d'une déformation de gonflement au gel dans l'ESG10, un relâchement de la condition de frettage à la base du GB20, une condition de glissement partiel entre couches d'enrobé et l'apparition au niveau de cette même interface d'une fissure transversale verticale à proximité de la TML_229. Nous superposons successivement ces effets dans les sections suivantes.

13.4.1 Effet d'une déformation de gonflement dans l'ESG10

La Figure 100 montre l'effet de la prise en compte d'une déformation de gonflement dans l'ESG10 sur la réponse des jauges, par comparaison à celle calculée en condition sèche. La valeur de ε_g est prise égale à $300 \mu def$ qui conduit in fine à un bon calage des courbes simulées avec les mesures, une fois tous les effets listés ci-avant additionnés. La principale conséquence de ε_g est de réduire les déformations transversales en contraction du bas d'ESG10 et de GB20. Par contre, l'amplitude de la déformation en bas de GB20 ainsi obtenue est trop faible par rapport à la mesure (Figure 95). On observe par ailleurs que le gonflement ε_g est sans grand effet sur les déformations longitudinales du fait du frettage en bas de GB20 et du collage parfait entre couches d'enrobé.

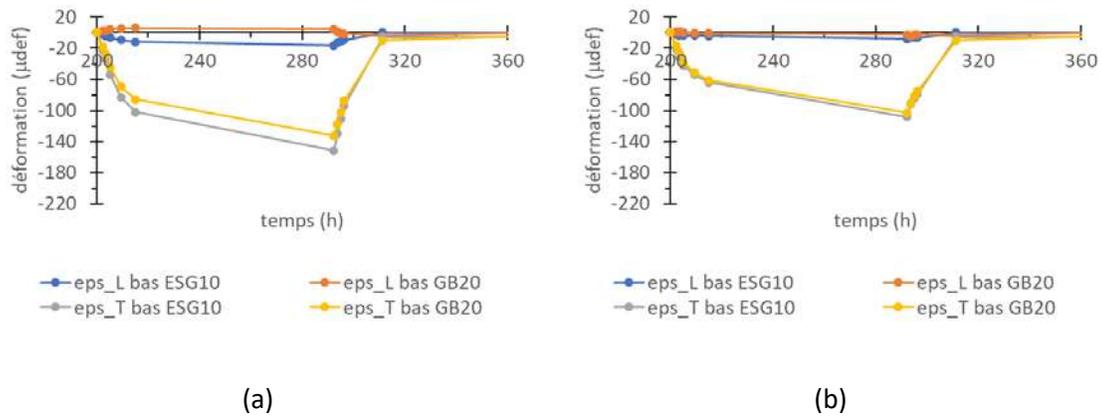


Figure 100 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition sèche, (b) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu def$ (toute autre condition étant égale par ailleurs)

13.4.2 Effet du relâchement du « frettage apparent » en bas de GB20

Un relâchement du frettage apparent en bas de GB20, modélisé par ressorts horizontaux, semble nécessaire pour augmenter la déformation transversale en bas de cette couche. Par comparaison au calcul précédent (rappelé en Figure 101a), la Figure 101b montre le résultat obtenu en divisant par un facteur 3 les coefficients $fret_L^{sol}$ et $fret_T^{sol}$ dans les deux directions du plan, initialement calés sur la mégaphase B en condition sèche. Ceci permet d'obtenir le bon ordre de grandeur pour

la déformation transversale en bas de GB20. On obtient aussi une légère augmentation des déformations longitudinales en contraction aux emplacements des jauges TML_229 et TML_391 qui rapproche les simulations des observations. Par contre, la déformation transversale en bas d'ESG10 est toujours égale à celle calculée en bas de GB20 et donc maintenant trop importante par rapport à la mesure. Pour découpler partiellement ces deux déformations, il paraît nécessaire d'introduire une possibilité de glissement partiel entre couches d'enrobé.

Nota : la réduction par un facteur 3 de la rigidité des ressorts de « frettage » ne traduit pas forcément une diminution des propriétés de frottement de la GB20 sur son support. Elle peut surtout être due à l'approximation dans le modèle d'un frottement de Coulomb qui est une loi d'interface non linéaire par des ressorts à comportement linéaire dont la rigidité « apparente » n'est alors pas intrinsèque mais est aussi fonction des déformations $\alpha\theta$ et ε_g dans le cas humide dans les enrobés. ε_g tend alors à faire décroître la valeur de cette rigidité « apparente ».

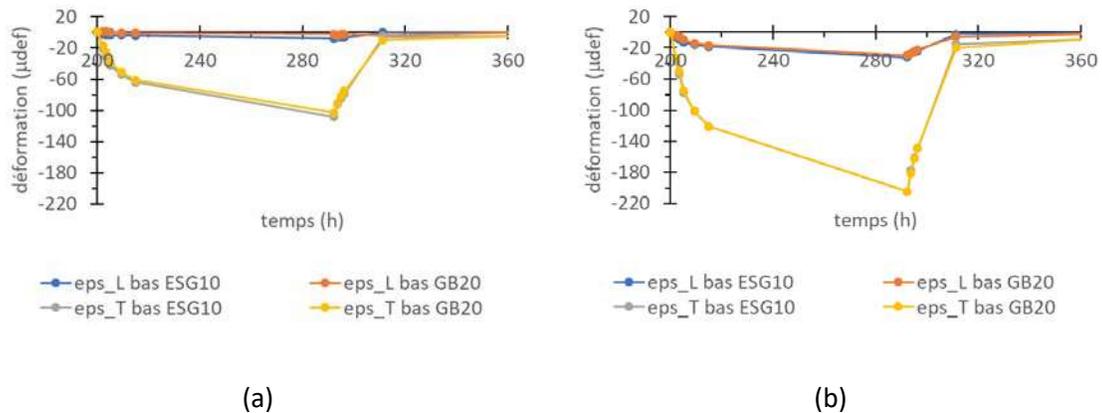


Figure 101 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$, (b) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$ et diminution par un facteur 3 des coefficients de frettage apparent $\text{fret}_L^{\text{sol}}$ et $\text{fret}_T^{\text{sol}}$.

13.4.3 Introduction d'un glissement partiel entre couches d'enrobé

Une condition de glissement partiel entre couches d'enrobé a été introduite au moyen de ressorts « nodaux » dans les directions horizontale et verticale, positionnés à l'interface ESG10/GB20. La Figure 102b montre le résultat obtenu après calage. Par rapport au calcul précédent (rappelé sur la Figure 102a), les déformations transversales en bas d'ESG10 et de GB20 sont à présent bien

distinctes et d'amplitudes proches des mesures pour l'ensemble des jauges et des 3 cycles de la mégaphase G, hormis pour les jauges longitudinales TML_229 et TML_391 sans doute affectées par de la fissuration comme montré plus loin dans ce rapport.

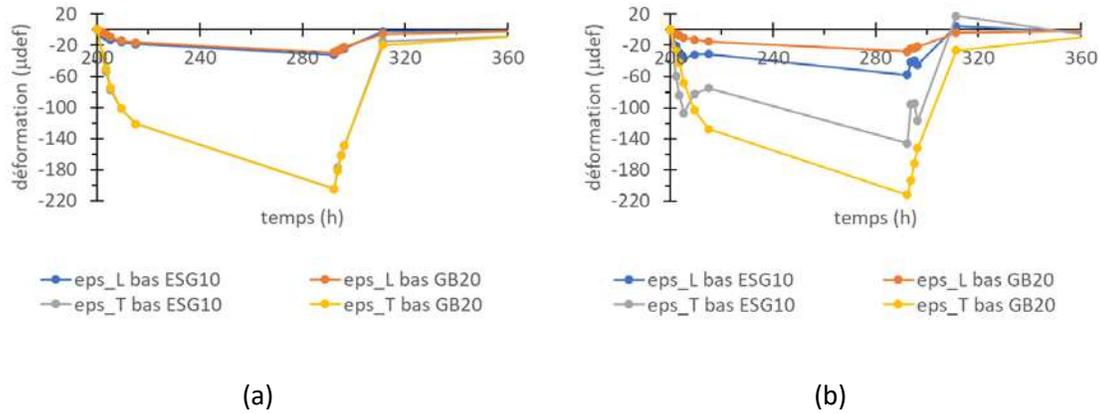


Figure 102 : Déformation longitudinales et transversales calculées en bas d'ESG10 et de GB20. (a) calcul en condition humide avec $\varepsilon_g = 300 \mu\text{def}$ et réduction des coefficients $\text{fret}_L^{\text{sol}}$ et $\text{fret}_T^{\text{sol}}$, (b) idem (a) + ressorts à l'interface entre couches d'enrobé pour simulation de conditions de glissement partiel.

13.4.4 Sollicitation au niveau de l'interface

Le choix a été fait ici d'avoir les mêmes valeurs de rigidité d'interface ESG10/GB20 dans les directions longitudinale et transversale ($K_{\text{fret}}^{\text{EB}}$). Les calculs ont alors montré que la valeur de $K_{\text{fret}}^{\text{EB}}$ pouvait être assez bien déterminée par calage inverse des mesures de jauges (de l'ordre de 180 N/mm correspondant à une raideur surfacique de l'ordre 0.2 MPa/mm). Par contre, la valeur de raideur verticale ne peut être déterminée par calage inverse des mesures TML. La plage de valeurs possibles reste ouverte.

La Figure 103 illustre les déformations verticales dans la couche d'accrochage à l'interface ESG10/GB20 (représentées sur la figure sous forme de sauts de déplacement relatifs) pour deux valeurs de raideur verticale significativement différentes. Les déformations changent de signe au cours d'un cycle de gel-dégel et induisent des alternances d'efforts de traction/compression à l'interface. Les amplitudes de déformation et de force dépendent fortement de cette raideur verticale. Des déformations importantes et de faibles efforts sont obtenus pour de faibles raideurs et *vice versa*. Ces mouvements et ces efforts sollicitent l'interface et pourraient être de nature à

l'endommager en un faible nombre de cycles. Cela pourrait s'avérer d'autant plus vrai *in situ* dans le cas d'une interface déjà vieillie ayant perdu une partie de ses capacités de fluage et ductilité.

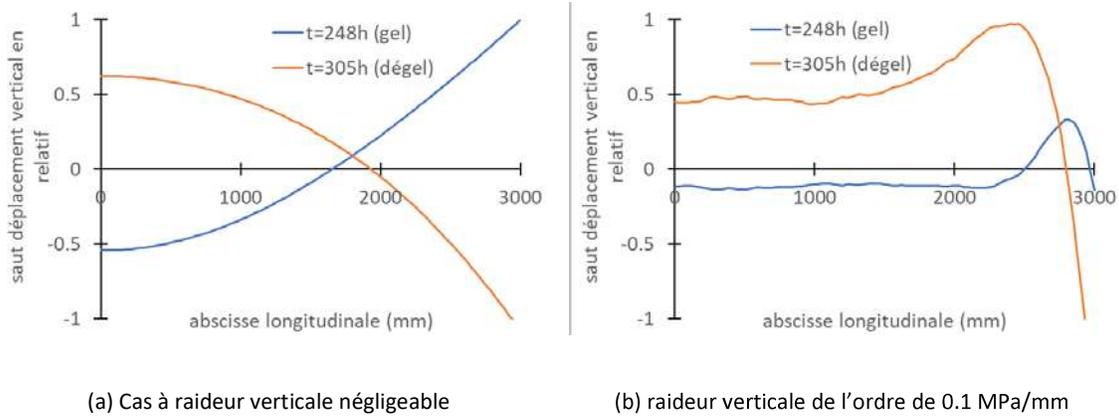


Figure 103 : Profils longitudinaux du saut de déplacement vertical à l'interface ESG10/GB20 sous bande de roulement à deux instants pris pendant les phases de gel et de dégel. A gauche : cas d'une raideur verticale négligeable avec forte amplitude de saut de déplacement et faible effort d'arrachement; à droite : cas d'une raideur de l'ordre de 0.1 MPa/mm avec faible amplitude de saut de déplacement et effort d'arrachement significatif.

La section suivante récapitule les hypothèses et valeurs des paramètres introduites jusqu'à présent et illustre la comparaison entre résultats de calcul et mesures pour un pas de calcul plus fin.

13.4.5 Récapitulatif des premiers résultats de simulation et comparaison avec les mesures de jauge

Nous récapitulons ici les résultats de calculs obtenus avec les valeurs de paramètre déterminées précédemment et rappelées au Tableau 16. Par ailleurs, le pas de discrétisation temporelle a été pris plus petit que précédemment pour suivre de plus près l'historique des températures d'essai, notamment des thermistances C1_1 et C1_5 qui servent de conditions limites aux calculs thermiques.

Tableau 16. Données récapitulatives des paramètres d'entrée du modèle pour la simulation de la réponse des jauges au cours du second cycle de gel-dégel (hormis jauges TML_229 et TML_391).

E_{ESG10} (MPa)	E_{GB20} (MPa)		K_{sol} (MPa/mm)	$fret_L^{sol}$	$fret_T^{sol}$	K_{fret}^{EB} (N/mm)	ε_g	α (def/°C)
1700	1900		1.2	0.25	0.25	180	300	25×10^{-6}

Les Figure 105 et Figure 106 montrent les comparaisons entre résultats de calcul et mesures TML pour les cycles 1 et 2 (hormis jauges TML_229 et TML_391 traitées dans la section suivante). Malgré la prise en compte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices considérées dans le modèle dont l'omission du caractère viscoélastique des enrobés, un assez bon accord est obtenu pour l'ensemble des jauges sur les phases de descente en température qui conjuguent contraction thermique et déformation de gonflement au gel dans l'ESG10. Par construction, les déformations numériques suivent les consignes en température et reviennent donc en fin de cycle aux alentours de zéro après dégel. Les courbes expérimentales montrent pour leur part des déformations résiduelles (remises à zéro au début de chaque cycle) relativement importantes qui traduisent une certaine irréversibilité dans le comportement de la structure (frettages non purement élastiques, déformation de gonflement non totalement réversible...) dont il n'est pas tenu compte dans ces premiers calculs mais qui sera abordée dans la section suivante.

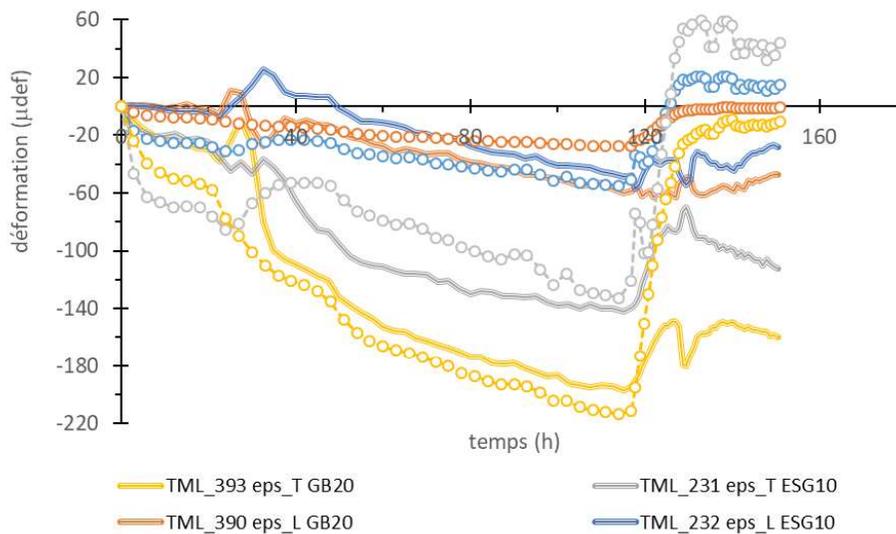


Figure 104 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec pas de temps de l'ordre de l'heure pour le cycle #1.

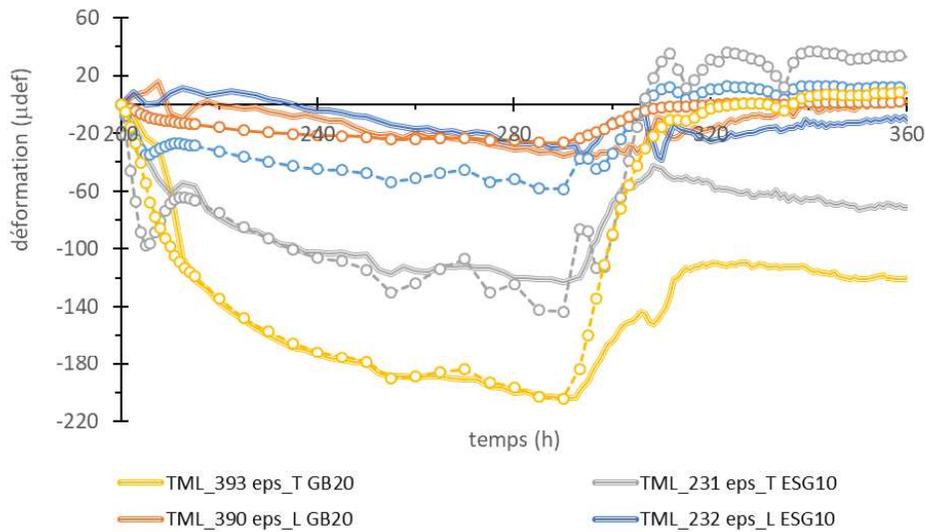


Figure 105 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec pas de temps de l'ordre de l'heure pour le cycle #2.

13.5 Effets additionnels et modélisations associées

13.5.1 Effet d'une saturation partielle de la couche de GB20

Les calculs précédents ont été réalisés en supposant que seul l'ESG10 contenait de l'eau, comme prévu au départ. Cependant, les carottages effectués au démontage de la planche d'essai (Section 17) ont montré que la GB20 a finalement été aussi partiellement saturée par infiltration au travers de la couche d'accrochage. On peut donc penser qu'elle a également été soumise à des déformations de gonflement dû au gel au cours de la mégaphase G. De nouveaux calculs appliqués au cycle 2 ont donc été effectués avec cette hypothèse en appliquant la loi de comportement avec déformation de gonflement (Eq. 10) à la GB20, sans chercher à optimiser le calage avec les mesures (Figure 107). Ceux-ci permettent de reproduire convenablement les mesures des jauges (TML_230, 231, 390, et 393), en conservant $\varepsilon_g = 300 \mu def$ dans l'ESG10, en prenant $\varepsilon_g = 100 \mu def$ dans la GB20 et en diminuant la rigidité des ressorts horizontaux de « frettage » à la base de la GB20 ($fret_L^{sol} = fret_T^{sol} = 0.125$). Ces changements ne remettent pas en cause les constats faits lors des premiers calculs. L'hypothèse de déformation de gonflement dans la GB20 n'est donc pas incompatible avec les observations de la section précédente.

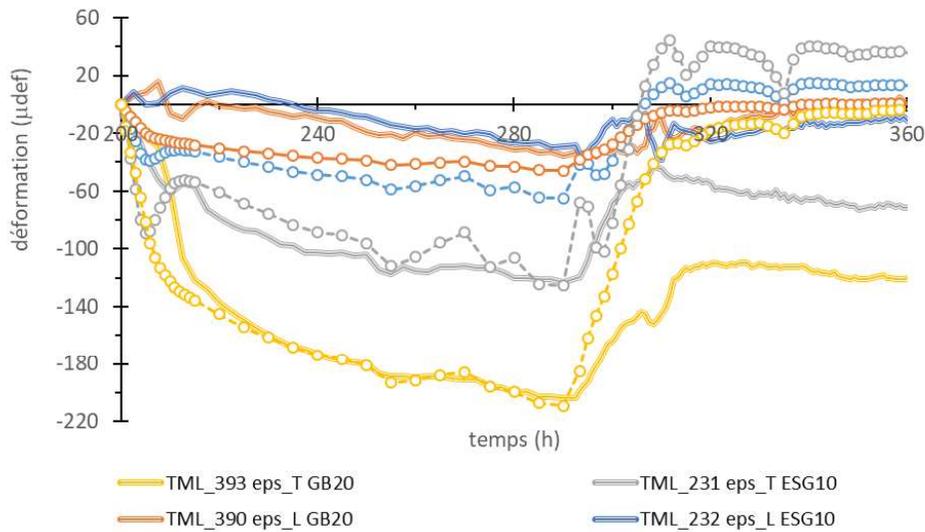


Figure 106 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec déformation de gonflement dans la GB20 et diminution de frottement en bas de GB20 (cycle #2).

13.5.2 Modification des conditions de frottement en cours de cycle de gel-dégel

Pour rappel, les conditions de frottement introduites dans le modèle sont censées rendre compte de frottements entre couches dont le fonctionnement n'est pas totalement réversible (cf. loi plastique de frottement de Coulomb). Ainsi, lors d'une inversion du sens d'une sollicitation (en l'occurrence passage de descente à remontée de température) les glissements qui s'effectuaient avant inversion vont d'abord marquer une phase d'arrêt avant de changer de sens. L'état de contrainte de cisaillement doit au préalable vaincre un nouveau seuil de contrainte de signe opposé. Cet effet peut être modélisé de façon approximative en passant à des calculs avec loi de comportement de type « élasticité incrémentale » ($\dot{F} = k(t)\dot{u}$) et en raidissant au moment $t_{inversion}$ de début de dégel les ressorts de frottement en bas de GB20 et à l'interface ESG10/GB20 de façon à bloquer les glissements d'interface (avant $t_{inversion}$, $k(t) = k^-$ et après $k(t) = k^+$).

La Figure 108 illustre les résultats obtenus par un tel calcul où k_{EB}^- et k_{sol}^- ont mêmes valeurs que dans le paragraphe précédent ($k_{EB}^- = 180 \text{ N/mm}$, $k_{sol}^- = K_{sol} \times fret^{sol-} = K_{sol} \times 0.125$) et où k_{EB}^+ et k_{sol}^+ sont pris égaux, à partir de $t_{inversion} \approx 290 \text{ h}$, aux raideurs du cas sec ($k_{EB}^+ = +\infty$, $k_{sol}^+ = K_{sol} \times fret^{sol+} = K_{sol} \times 0.75$). La déformation de gonflement dans la GB20 est conservée dans ce calcul. On observe que ces modifications des conditions de frottement en cours

de calcul permettent de rendre compte des offsets (non-retour à zéro) des déformations transversales expérimentales (TML_390 et 393) en fin de cycle. Le calage d'ensemble reste par ailleurs satisfaisant même si quelques ajustements des paramètres permettraient sans doute d'améliorer encore la comparaison simulation/essai.

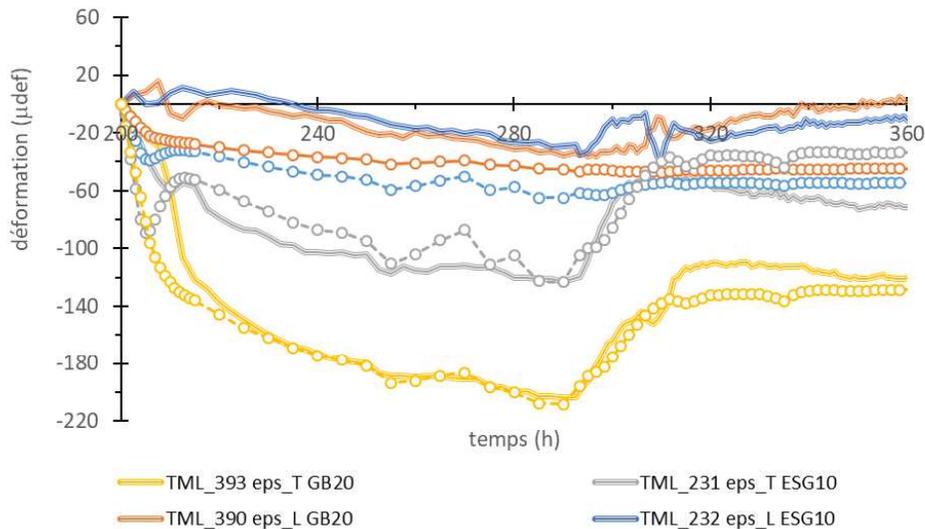


Figure 107 : Déformation longitudinales et transversales mesurées et calculées (courbes pointillées avec marqueurs) en bas d'ESG10 et de GB20. Calculs réalisés avec déformation de gonflement dans la GB20 et raidissement du frettage entre ESG10/GB20 et en bas de GB20 (cycle #2).

13.5.3 Effets localisés vus au niveau des jauges longitudinales TML_229 et TML_391

Les jauges longitudinales TML_229 (bas ESG10) et 391 (bas GB20) situées sur un même axe vertical montrent des comportements atypiques qui évoluent au cours des cycles de la mégaphase G et diffèrent des autres jauges longitudinales implantées (ex. TML_232 et 390) dans la structure. Ces comportements sont rappelés sur la Figure 109. Ils se caractérisent par des extensions apparaissant dès le début des cycles #2 et #3 et, au cycle #2, par des modifications « brutales » de l'évolution des déformations aux alentours de 300h (remontée en température et dégel). En dehors de cet épisode où les déformations longitudinales en bas d'ESG10 et GB20 évoluent dans des sens opposés, celles-ci sont quasiment superposées. En se basant sur les modélisations déjà réalisées jusque-là, on peut penser que l'apparition de déformations longitudinales en extension peut être attribuée à la présence de fissure(s) verticale(s) ayant pris naissance au niveau de l'interface ESG10/GB20 dans la zone des jauges

TML_229 et 391. Un délaminage local de cette interface pourrait par ailleurs expliquer les évolutions et la séparation des signaux observés aux alentours des 300h. Ces phénomènes locaux ne sont pas sans rappeler les constatations expérimentales sur bicouche bitumineux faites dans la thèse de T.V. Vu (2017) et pourraient être les premiers signes d'un endommagement de la structure. Les essais à grand nombre de charges répétées effectués à la suite de ces cycles de gel-dégel n'ont pas mis en évidence de désordres en surface de chaussée (ex. fissuration, nids de poule...) qui seraient potentiellement issus de ces endommagements précoces sous cycles thermiques de la structure humide, liés au gel. Il est possible de penser qu'une chaussée en service depuis plusieurs années ayant subi vieillissement et trafic aurait possiblement atteint des états d'endommagement plus significatifs pour les mêmes conditions ?

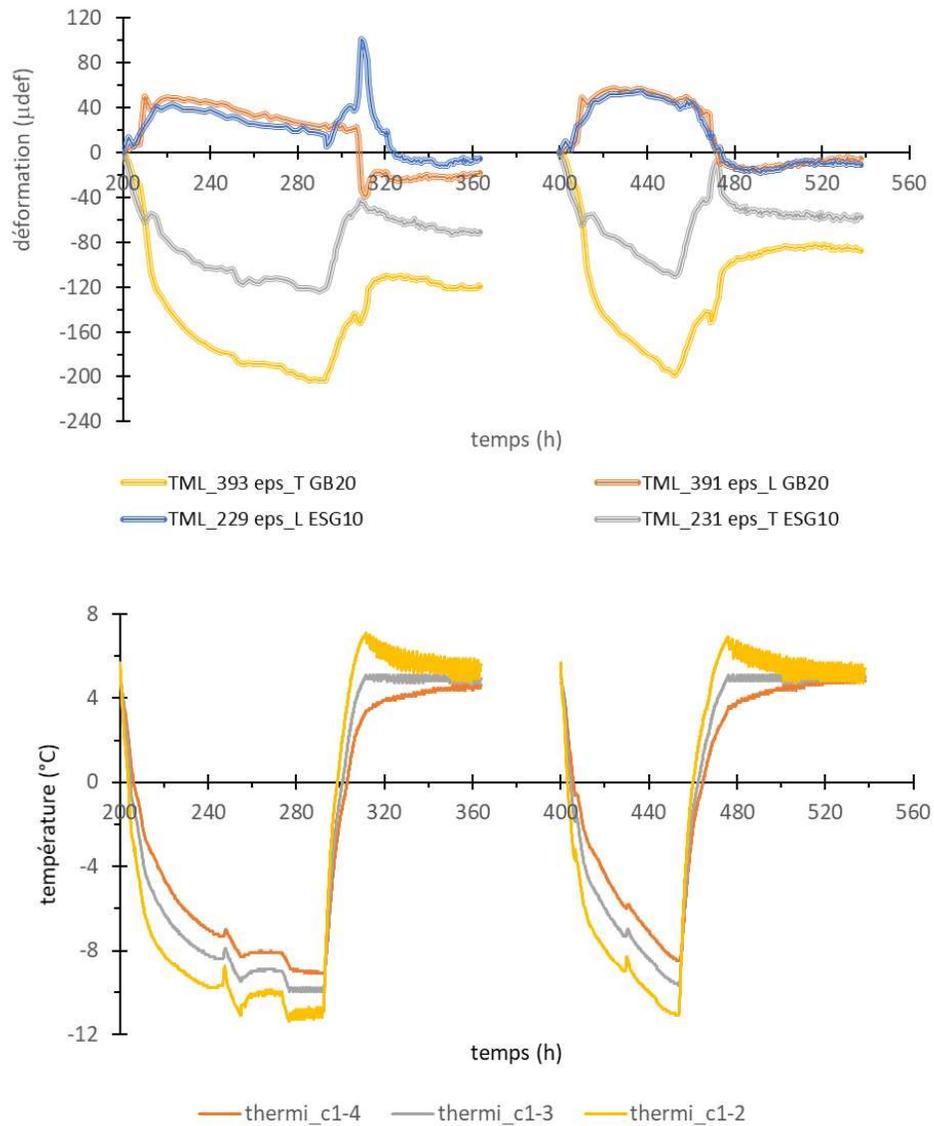


Figure 108 : (haut) Déformations longitudinales et transversales en bas d'ESG10 et de GB20 aux cycles #2 et #3 montrant, pour les jauges longitudinales (TML_229 et 391), des réponses atypiques différentes de celles du cycle #1 et des jauges TML_232 et 390 aux cycles #2 et #3 (Figure 96b). (Bas) Rappel des courbes de température mesurées par les thermistances c1-2, c1-3 et c1_4 au cours des cycles #2 et #3.

13.6 Récapitulatif des principales observations sur les cycles de gel-dégel en conditions humides sans charge mécanique

- Comme dans le cas sec, les amplitudes de déformation mesurées sont plus importantes dans la direction transversale que dans la direction longitudinale.

- Les déformations transversales mesurées en bas d'ESG10 et de GB20 se répètent bien pour l'ensemble des jauges TML au cours des trois cycles thermiques, traduisant une bonne homogénéité de la structure à ce niveau. Les déformations transversales qui étaient semblables en bas d'ESG10 et de GB20 dans le cas sec se démarquent dans le cas humide, avec une amplitude de déformation en bas d'ESG10 plus faible qu'en bas de GB20 (contraction).
- La présence de déformation de gonflement due au gel dans l'ESG10 est manifeste à la lecture des mesures TML dans le sens transversal (notamment en fin de descente en température) et par comparaison au cas sec.
- Pour une verticale donnée dans la structure, les déformations longitudinales mesurées en bas d'ESG10 sont proches de celles mesurées en bas de GB20. Par contre, les deux couples de jauges mesurant ces déformations, chacun placé sur une verticale différente dans la structure, enregistrent des valeurs différentes avec un écart qui évolue au cours des cycles (en particulier, déformations d'extension et pic de déformation en bas d'ESG10 au cycle #2 pour un des couples de jauges). Ces écarts peuvent sans doute être attribués à des phénomènes locaux de type fissuration et/ou délaminage, se produisant à proximité de l'interface ESG10/GB20 et qui pourraient évoluer au cours des cycles.
- La modélisation de la réponse de la structure en condition humide, soumise à ces trois cycles de gel/dégel, a été effectuée en adaptant le script de calcul EF et le maillage 3D utilisés en condition sèche, pour pouvoir tenir compte de conditions de frettage à l'interface ESG10/GB20 (en sus du frettage en bas de GB20) et potentiellement de zones endommagées de faible épaisseur voire de délaminage le long de cette interface.
- Dans un premier temps, il a été supposé que seul l'ESG10 était partiellement saturé (comme souhaité au départ). Pour pouvoir reproduire les mesures (hors phénomènes locaux), il a fallu dans le modèle, par rapport au cas sec, ajouter une déformation de gonflement dû au gel dans l'ESG10, relâcher le frettage en bas de GB20 et introduire un glissement partiel à l'interface ESG10/GB20.
- Cependant, des essais de teneur en eau sur carottes prélevées après accomplissement des mégaphases ont montré que de l'eau était aussi présente dans la GB20. Des simulations du comportement de la structure en tenant compte de cette information a posteriori, c'est à dire en

incluant dans le modèle une déformation de gonflement dans la GB20 et moyennant l'adaptation de la valeur des ressorts de frettage horizontaux en bas de GB20, ont également permis de correctement simuler les mesures de jauges. L'hypothèse de gonflement dans la GB20 n'est donc pas incompatible avec les conclusions du point précédent.

- En plus des constats déjà énumérés, les mesures TML montrent d'importantes déformations résiduelles en fin de cycle de gel-dégel, traduisant une certaine irréversibilité du comportement de la structure (frettages non purement élastiques, déformation de gonflement non totalement réversible...). Pour pouvoir rendre compte de celles-ci de façon approximative au travers de conditions de frottement variables au cours du temps dans les simulations, le script de calcul EF a été transformé pour permettre un fonctionnement selon des lois de comportement de type « élasticité incrémentale ». Cela a permis de correctement retrouver les offsets de déformation transversale en fin de cycle, en frettant davantage la structure (interface ESG10/GB20 et du bas de GB20) au moment de la remontée en température.
- Quelques modélisations préliminaires semblent montrer que pour rendre compte des signaux atypiques des TML_229 et 391 au cours des cycles #2 et #3, il est nécessaire d'introduire des effets localisés de fissuration et/ou délaminage dans le modèle EF 3D.

14 Mégaphase G : cycles de gel/dégel avec passages de charges répétées en conditions humides (+5°C; -10°C)

À la suite des 3 cycles de gel-dégel précédemment décrits, de nouveaux cycles de gel/dégel (cycles 4 et 5 à une charge de 50 kN, cycles 6 et 7 à une charge de 65 kN) de durées plus ou moins longues ont été réalisés durant lesquels environ 50 000 passages de charges a été appliqué pour chaque cycle de descente et remontée en température (5 °C à -10 °C). Des détails supplémentaires seront ajoutés à la section 16, qui traite de l'endommagement accéléré et de l'orniérage. Nous examinons ici les réponses du cycle 6 (voir Figure 110) effectué avec une charge sur le demi-essieu Q de 65kN.

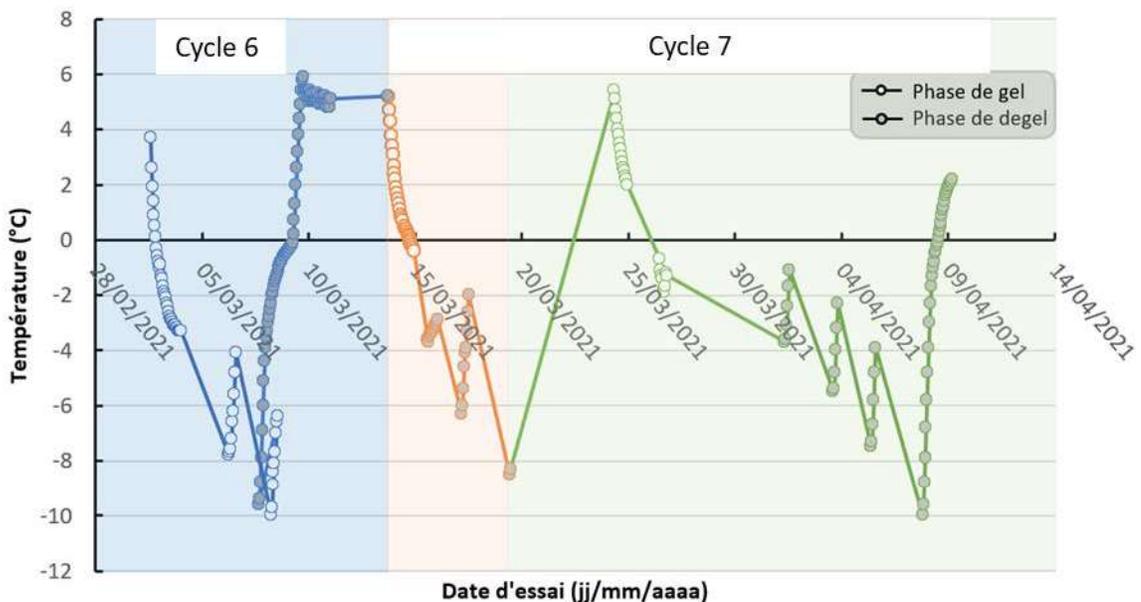


Figure 109: Température de l'interface mesurée pendant les cycles de gel-dégel #6⁸ et #7 et de chargement mécanique effectué à 65 kN.

14.1 Évolution des déformations pendant la phase de remontée en température du cycle #6

La Figure 111 montre les amplitudes de déformation (max-min au passage de la charge⁹) mesurées par les jauges TML_390 et TML_392 en bas de GB20 pour l'ensemble des passages effectués en cours de remontée en température. L'échelle de couleur indique la température de l'interface ESG10/GB20 au passage des charges. On constate des déformations très faibles tant que cette température est négative reflétant non seulement le module important des enrobés à basse température mais aussi la forte rigidité des couches granulaires aux températures négatives. Celle-ci avait déjà été relevée en conditions sèches; elle n'a pu que se renforcer après mouillage de la structure du fait des infiltrations au travers des couches d'enrobé (Section 17). La chaussée est donc faiblement sollicitée mécaniquement (sous charge roulante hors effets thermiques) pour toutes ces températures négatives. Au-dessus du zéro degré Celsius, les déformations remontent progressivement avec le dégel des couches granulaires et l'assouplissement des couches d'enrobé; elles reviennent à des valeurs relativement élevées, comparables à celles obtenues en conditions sèches.

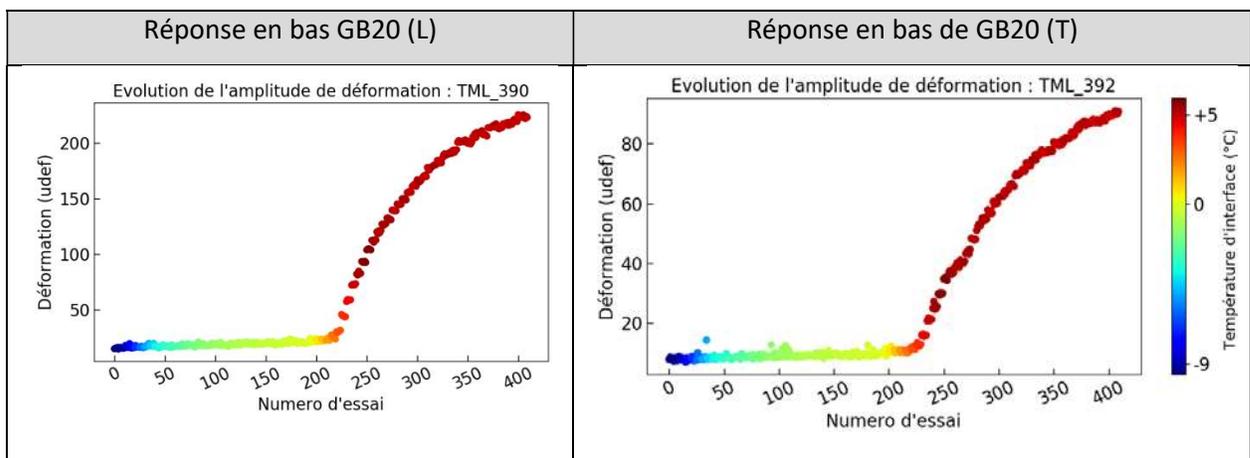


Figure 110: Amplitude maximale de déformation mesurée à la base de la couche de GB20 pendant la phase de dégel du cycle #6 (nota : le numéro d'essai correspond à un passage de charge pris parmi l'ensemble des passages réalisés pour un même profil vertical de température).

⁹ Par définition, ces amplitudes sont positives et ne rendent pas compte du signe des déformations qui ne change pas par rapport au cas sec pour toute condition restant identique par ailleurs.

La Figure 112 présente les amplitudes de déformation maximale mesurées de part de l'autre de l'interface ESG10/GB20. Globalement, on retombe sur les conclusions de la Figure 62 avec des valeurs du même ordre de grandeur (en valeur absolue). Les déformations de part et d'autre de l'interface sont proches aux températures négatives et s'éloignent au fur et à mesure que la température augmente.

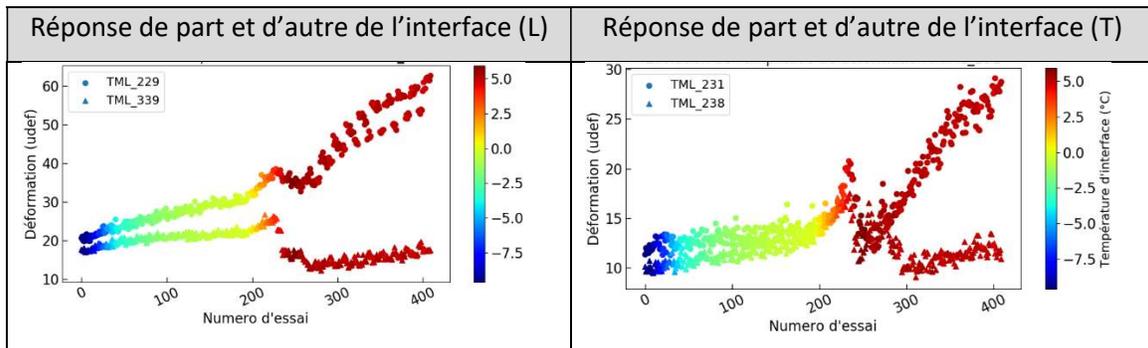


Figure 111: Amplitudes maximales de déformation mesurées à l'interface pendant la phase de dégel du cycle #6.

14.2 Comparaison avec les essais effectués à l'état sec

Trois passages de charge roulante effectués à des températures d'interface d'environ -10, 0, et 5°C pendant le cycle #6 de la MP G sont comparés ici aux passages des MP D, E et E_{inter} effectués à sec pour les mêmes températures d'interface et les mêmes charges à l'essieu (cf. Tableau 16).

Tableau 17. Conditions de comparaison entre l'état sec et humide pour différentes températures

MP	Nom	T interf. (°C)	Q (kN)	Cond. surface
D, E _{inter} , E	Chargement mécanique seul	5, 0 et -10	65	Sèche
G	Cycles gel-dégel + charge roulante	5, 0 et -10	65	Mouillée

14.2.1 Comparaison entre les MP E et G à $T_{interface} \approx -10^{\circ}C$

La Figure 113 présente le profil vertical de température mesuré par les thermistances au passage de la charge roulante sélectionné en MP G (cycle#6, passage #7). En supposant une température de gel θ_{gel} dans les matériaux granulaires égale à -1°C, on peut estimer la position du front du gel à une profondeur de -780 mm descendant quasiment au niveau de l'interface MG/sol.

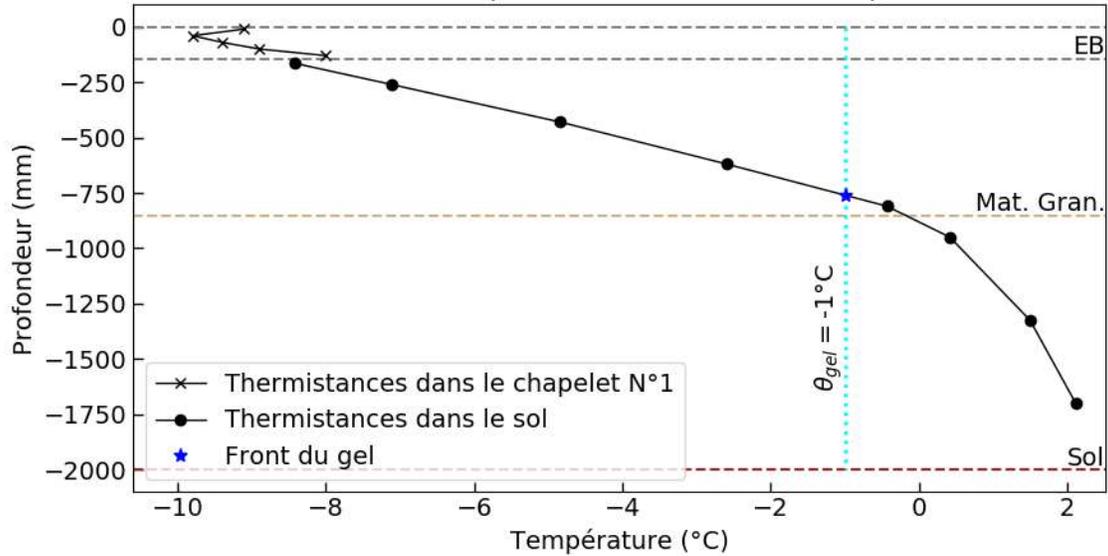


Figure 112: Profil de température dans la structure de la chaussée pendant l'essai G(cycle#6, passage #7).

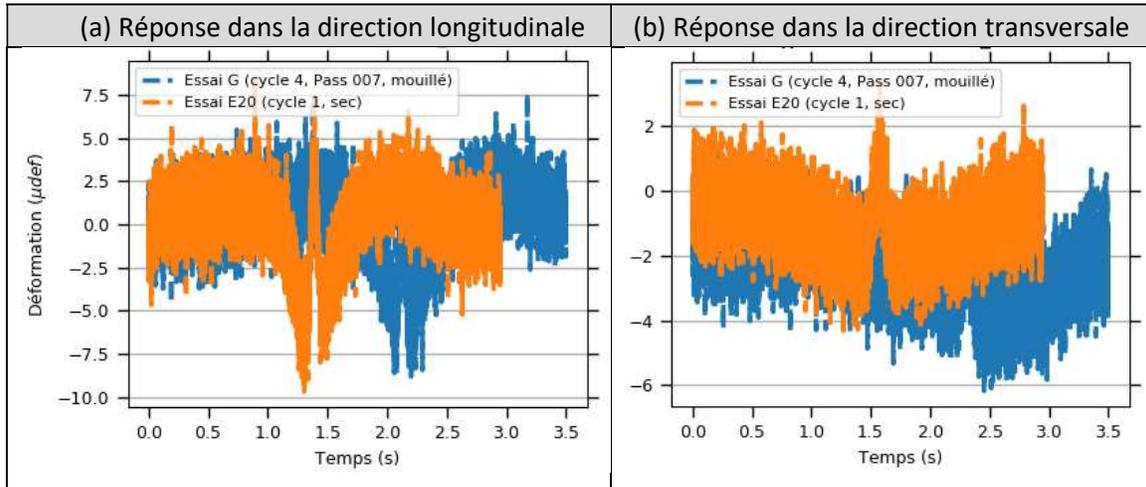


Figure 113: Déformations longitudinale (a) et transversale (b) mesurées en bas de GB20 pour les passages à $T_{interface} \approx -10^{\circ}\text{C}$ des MP E et G

Les réponses des jauges horizontales TML en bas de GB20 aux états sec et humide sont montrées sur la Figure 114. Ces résultats indiquent de très faibles déformations dans les deux directions et des signaux similaires pour les MP E et G, prouvant la présence d'eau gelée dans les matériaux granulaires dans ces deux phases et une forte rigidification par effet de gel de ces couches. La

Figure 115 conduit aux mêmes constatations pour les déformations en bas d'ESG10 et haut de GB20.

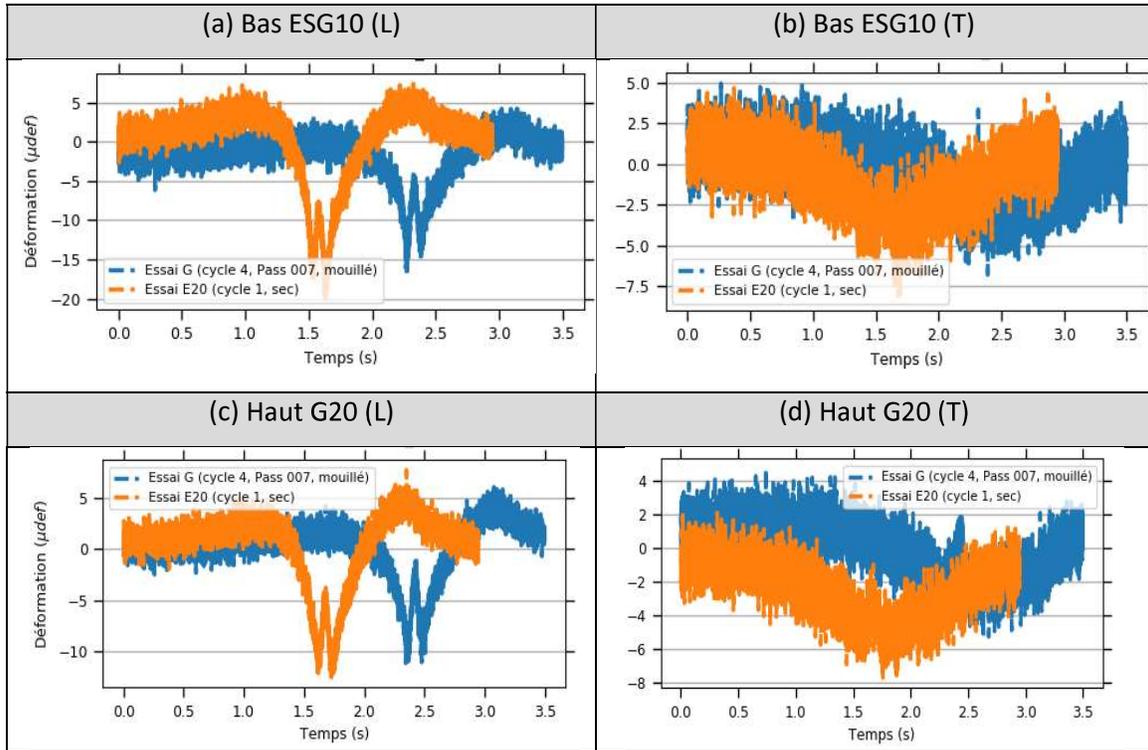


Figure 114: Comparaison entre les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 pendant les MP E et G à $T_{interface} \approx -10^{\circ}\text{C}$.

14.2.2 Comparaison entre les MP D et G à $T_{interface} \approx 5^{\circ}\text{C}$

Le profil vertical de température pour le passage de charge considéré en MP G (cycle#6, passage #400) est illustré sur la Figure 116. On observe sur cette figure que la quasi-totalité de la structure (EB, MG et sol) est repassée à température positive.

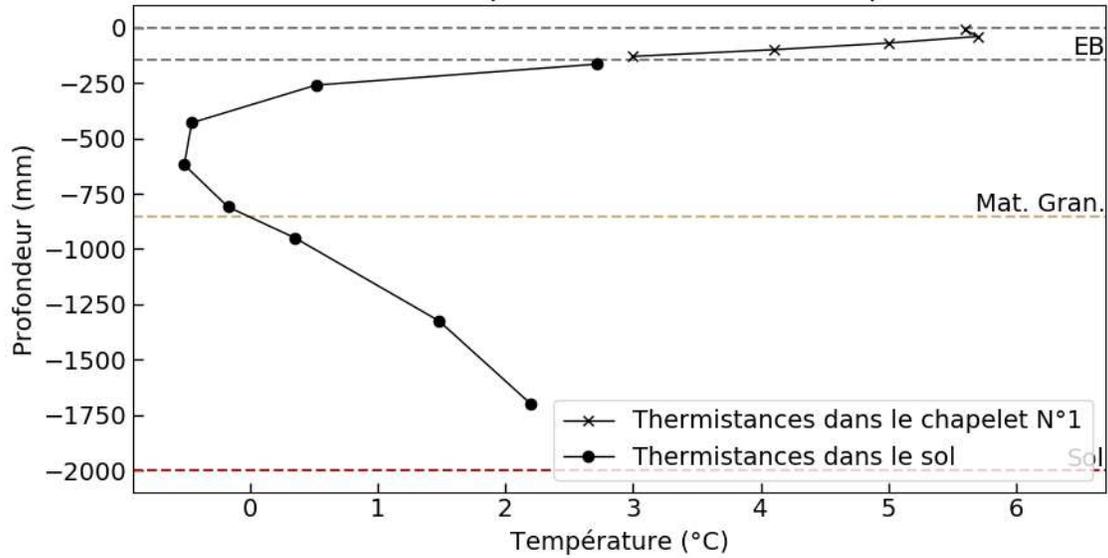


Figure 115: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage considéré en MP G (cycle#6, passage #400).

La Figure 117 compare les déformations horizontales sous charge roulante en bas de GB20 pour les MP D et G. Les déformations mesurées reprennent des valeurs caractéristiques de chaussée non gelée. Dans la direction longitudinale, les déformations des MP D et G sont identiques. Une légère différence, de l'ordre de $20 \mu def$, est observée sur les amplitudes de déformations transversales; la chaussée humide présentant des valeurs légèrement plus faibles.

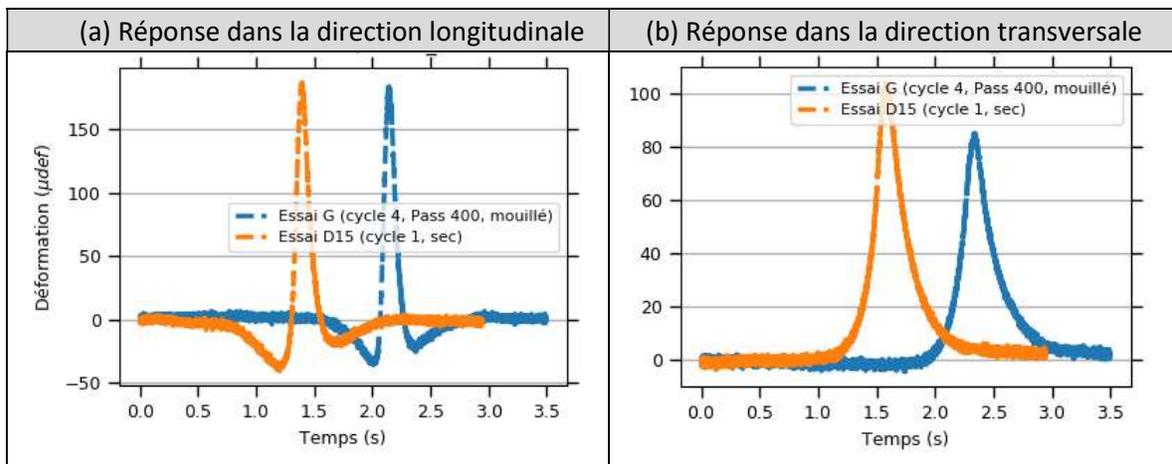


Figure 116: Déformations mesurées pour $T_{interface} \approx 5^\circ C$ pendant les MP D et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b).

La Figure 118 montre également que les déformations de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 pour les états sec et humide sont très proches compte tenu de l'amplitude limitée des signaux.

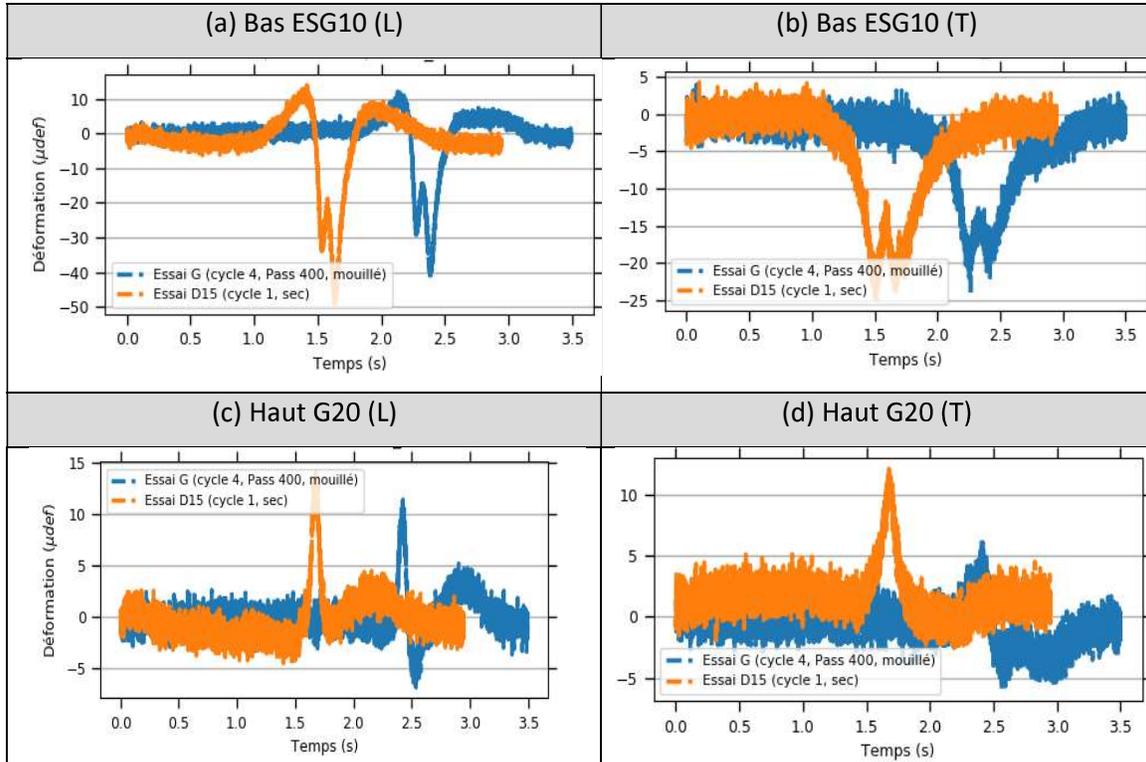


Figure 117: Comparaison entre les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 pour les MP D et G à $T_{interface} \approx 5^{\circ}C$.

14.2.3 Comparaison entre les MP E_{inter} et G à $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$, avec MG20 et MG112 gelés pour MP G

Le profil vertical de température, pour le passage retenu en MP G pour $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$ en cours de remontée de température, est illustré sur la Figure 119. Il montre que les couches de matériaux granulaires sont gelées à cet instant sur la quasi-totalité de leur épaisseur et vont donc présenter de fortes rigidités induites par le gel. Dans le cas de la MP E_{inter} , les passages de charges roulantes sont effectués à profil de température stabilisé ; pour une température d'interface de $0^{\circ}C$ les couches granulaires et le sol sont à température positive du fait de la température imposée à $2^{\circ}C$ en bas de la fosse. Les figures (Figure 120 et Figure 121) ci-dessous montrent à nouveau les différences très importantes de réponse de la structure obtenues en fonction de l'état gelé ou non des couches granulaires.

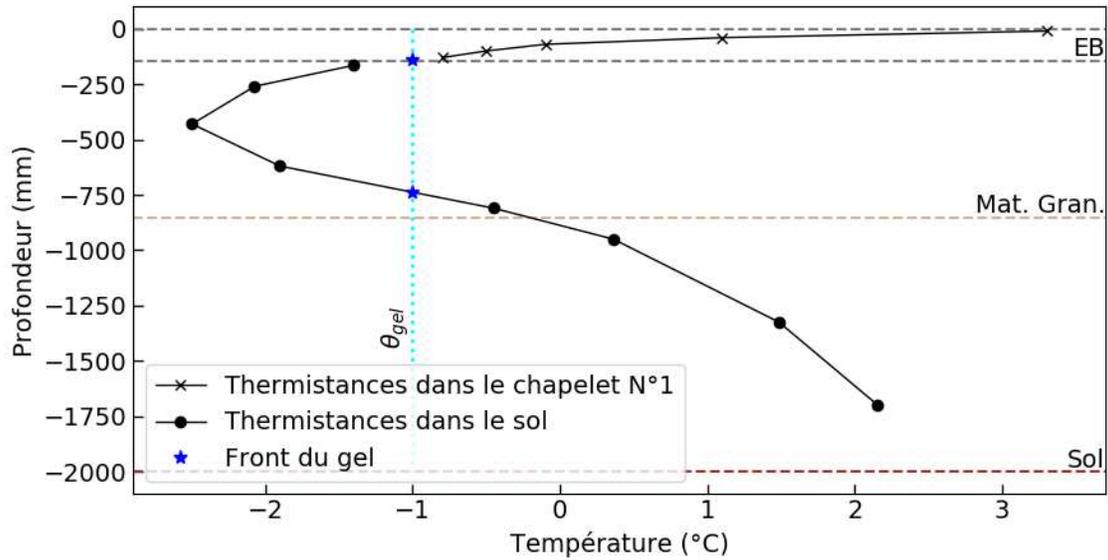


Figure 118: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage de la MP G(cycle#6, passage #193).

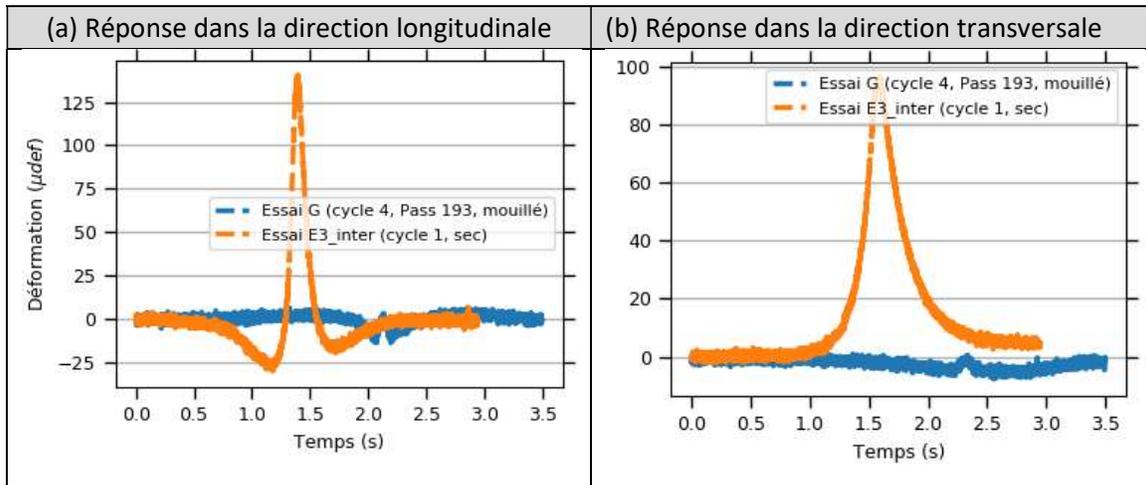


Figure 119: Déformations mesurées pour les MP E_{inter} et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}C$ et matériaux granulaires gelés pour MP G).

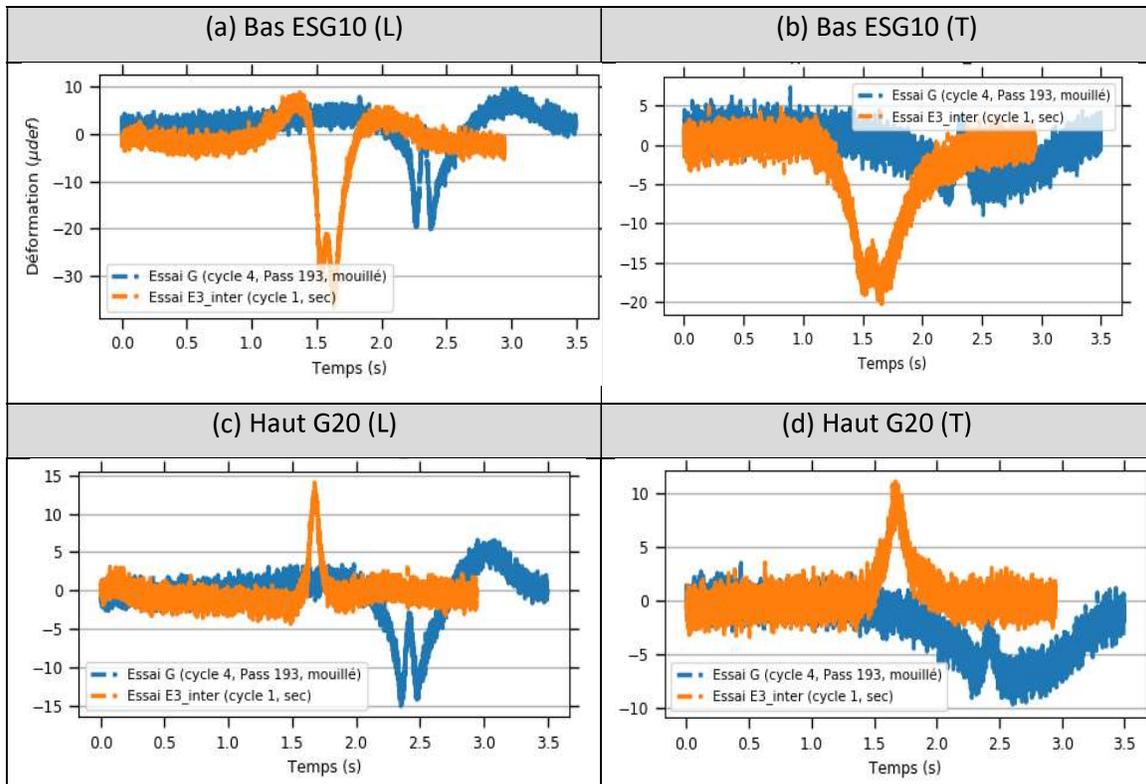


Figure 120: Déformations mesurées pour les MP E_{inter} et G de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}C$ et matériaux granulaires gelés pour MP G).

14.2.4 Comparaison entre les MP E_{inter} et G à $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$, avec MG20 et MG112 non gelés pour MP G

Pour illustrer l'effet spectaculaire du gel des matériaux granulaires sur la réponse de la structure, un autre passage de charge à $T_{interface} \approx 0^{\circ}C$ mais à température positive dans les couches granulaires (Figure 122) a été sélectionné. Comme montré sur les Figure 123 et Figure 124, des réponses semblables à celles de l'essai E_{inter} sont retrouvées pour ce passage.

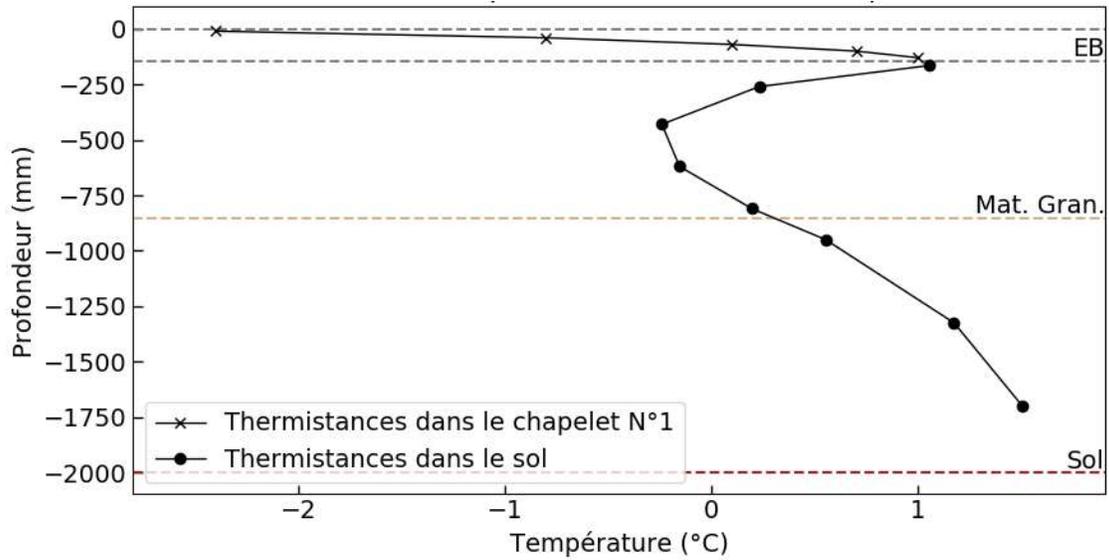


Figure 121: Profil vertical de température dans la structure de la chaussée pour le passage #33 (cycle #6) en MP G

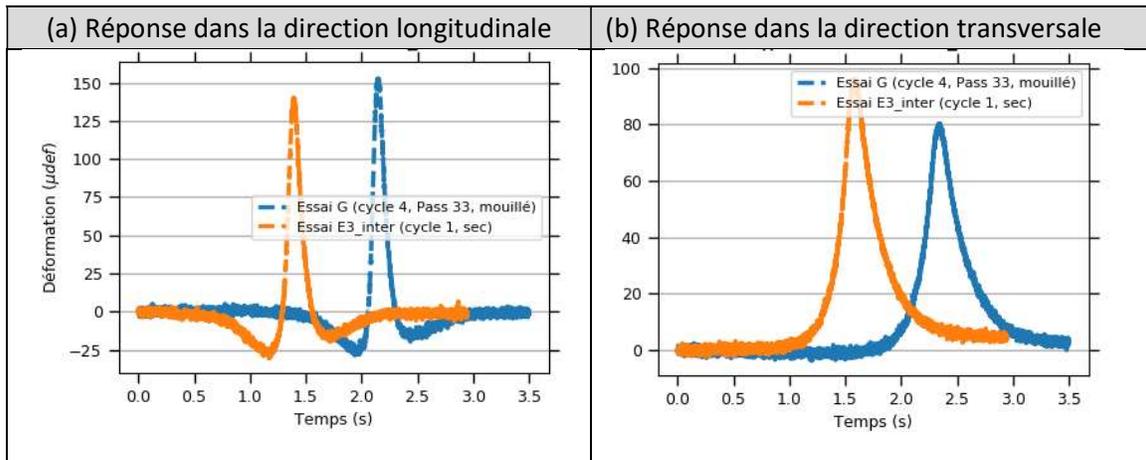


Figure 122: Déformations mesurées pour les MP E_{inter} et G en bas de GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}C$ et matériaux granulaires non gelés pour MP G).

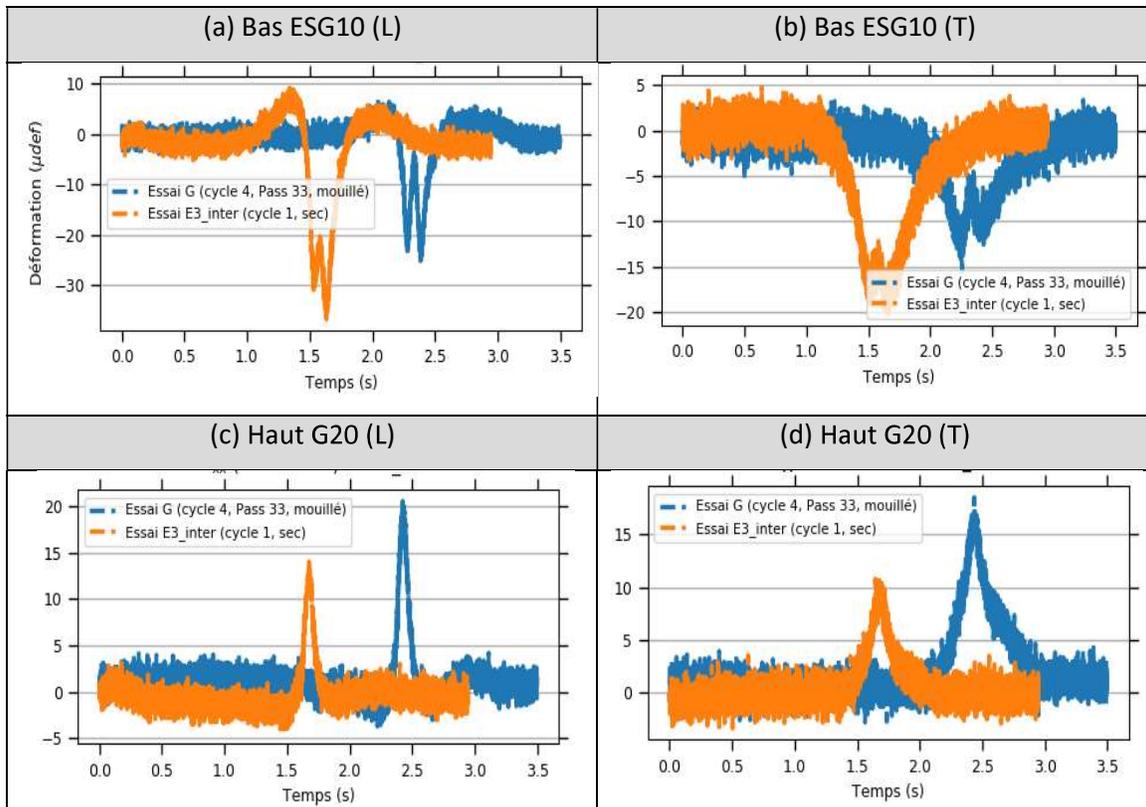


Figure 123: Déformations mesurées pour les MP E_{inter} et G de part et d'autre de l'interface ESG10/GB20 dans les directions longitudinale (a) et transversale (b) ($T_{interface} \approx 0^{\circ}\text{C}$ et matériaux granulaires non gelés pour MP G).

14.3 Résumé pour la MP G avec passages de charges roulantes

Les relevés factuels rapportés dans cette section ne sont pas exhaustifs. Les signaux de déformation examinés ici ne montrent pas d'évolution évidente de la réponse mécanique de la structure après les trois premiers cycles de gel/dégel de la mégaphase G. Ils montrent surtout l'impact du gel dans les matériaux granulaires, qui avait déjà été observé avant mouillage de la chaussée et qui résultait de la teneur en eau initiale de ces matériaux consécutive à leur mise en œuvre. La chaussée testée ici subit une forte rigidification aux températures négatives et n'est plus guère sollicitée sous charge roulante au niveau de ses couches bitumineuses. Ces conditions se révèlent plutôt favorables et peuvent expliquer l'absence de désordres avérés en surface de chaussée induits par le gel des EB et rapidement aggravés par la répétition des charges roulantes, comme cela s'est sans doute produit sur les chaussées réelles qui ont conduit à cette étude.

15 Auscultation mécanique sur la chaussée pendant les mégaphases

15.1 Défectomètre à masse tombante

Des essais au défectomètre à masse tombante (FWD) ont été effectués trois fois durant la séquence méthodologique, soit suite à la construction (préalablement présenté), après la Mégaphase E et à la fin de l'essai avant l'excavation. Cette section vise à faire le sommaire de la condition structurale de la chaussée expérimentale tout au long de la séquence, en rappelant notamment les résultats initiaux (post construction) présentés plus tôt dans ce rapport.

Il doit premièrement être rappelé que les premiers essais avec le défectomètre à masse tombante ont été effectués tout de suite après la construction. La chaussée n'avait pas subi de cycles thermiques ou mécaniques et les opérations de pavage étaient très récentes. De plus, après la Mégaphase E, la chaussée n'a pas encore été soumise à une exposition à l'eau; la condition de l'enrobé est considérée comme étant « sèche ». La chaussée a essentiellement subi des cycles de gel et dégel et un nombre limité de chargements en conditions sèches. Pour le cas des essais effectués à la toute fin de la séquence méthodologique, la chaussée est humide, a subi un nombre élevé de cycles de gel et dégel ainsi qu'environ 200 K cycles de chargements.

Les essais au défectomètre à masse tombante ont été effectués en $Y=1000$ mm pour $X=1500$, 3000 et 4000 mm et à des chargements visés de 27, 40, 53 et 71 kN. Les bassins obtenus ont été corrigés pour les charges et les températures pour les besoins des analyses. Les Figure 125 à Figure 127 présentent les bassins de déflexion pour chaque point de charge et moment durant l'essai.

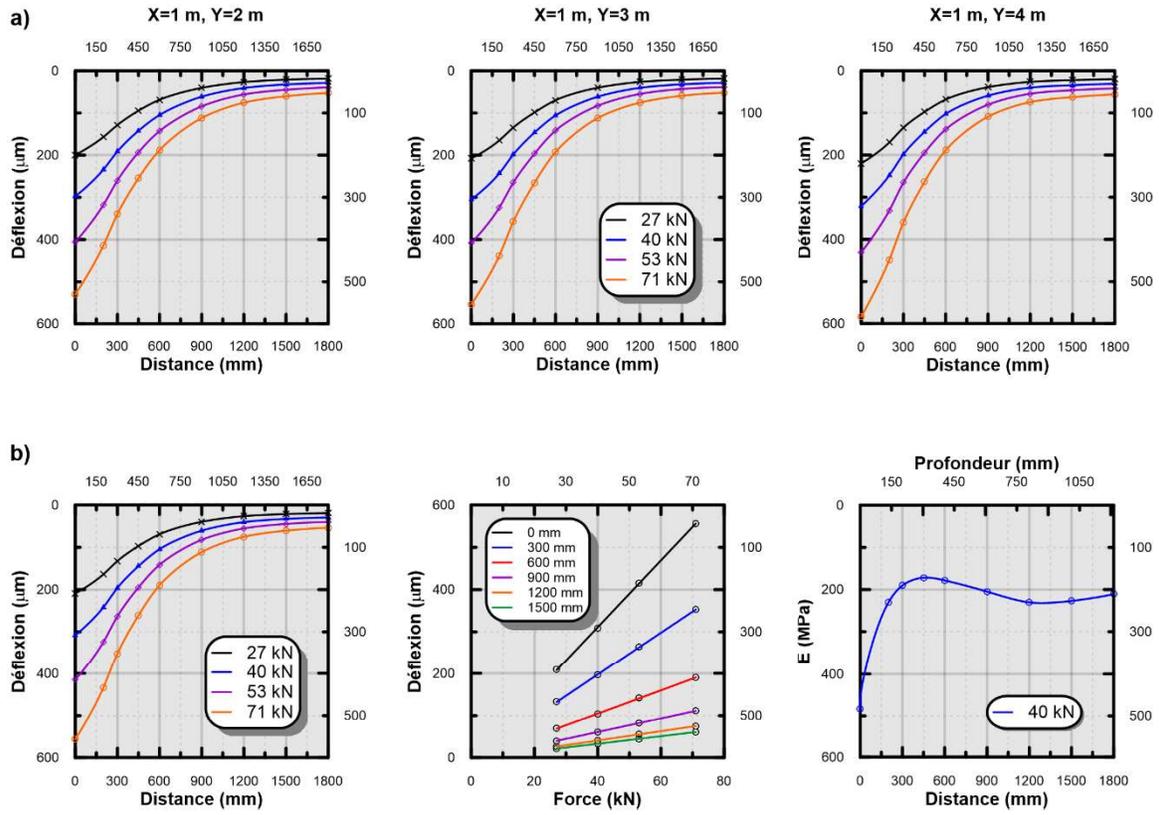


Figure 124. Résultats des essais FWD post construction : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface (rappel)

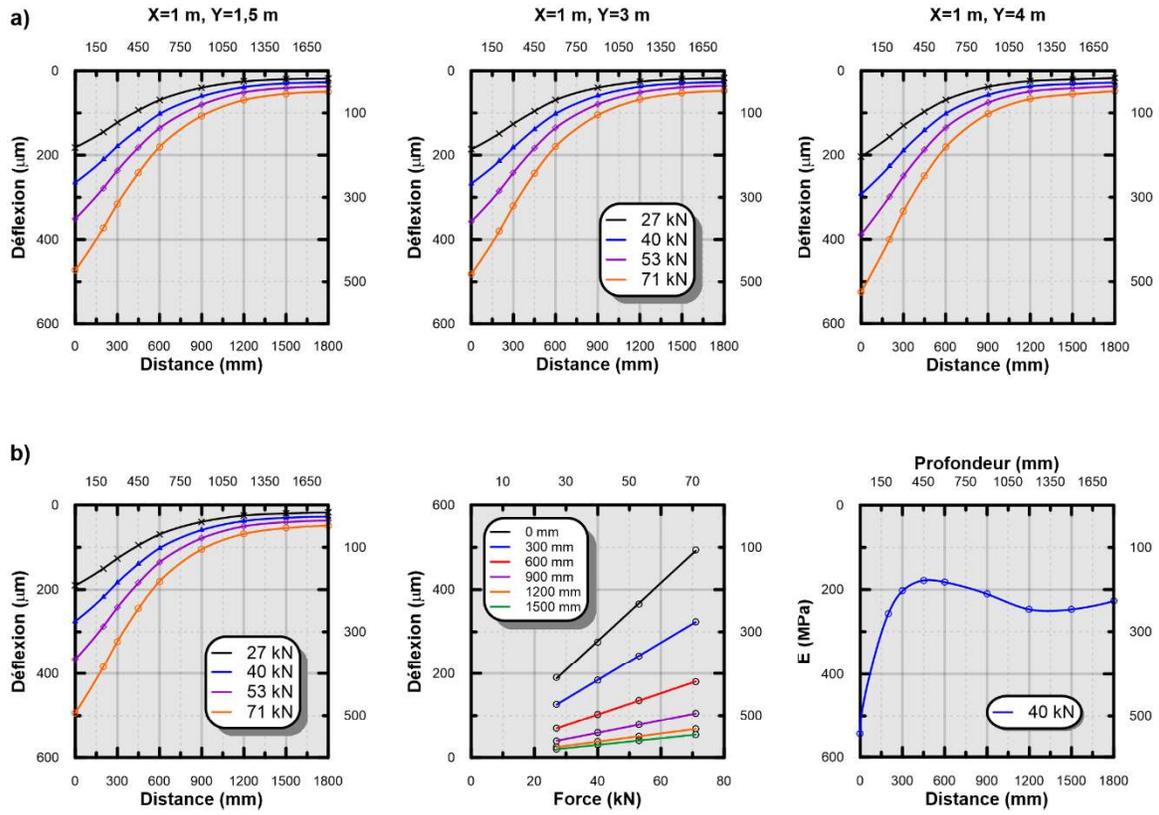


Figure 125. Résultats des essais FWD suite à la Mégaphase E : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface

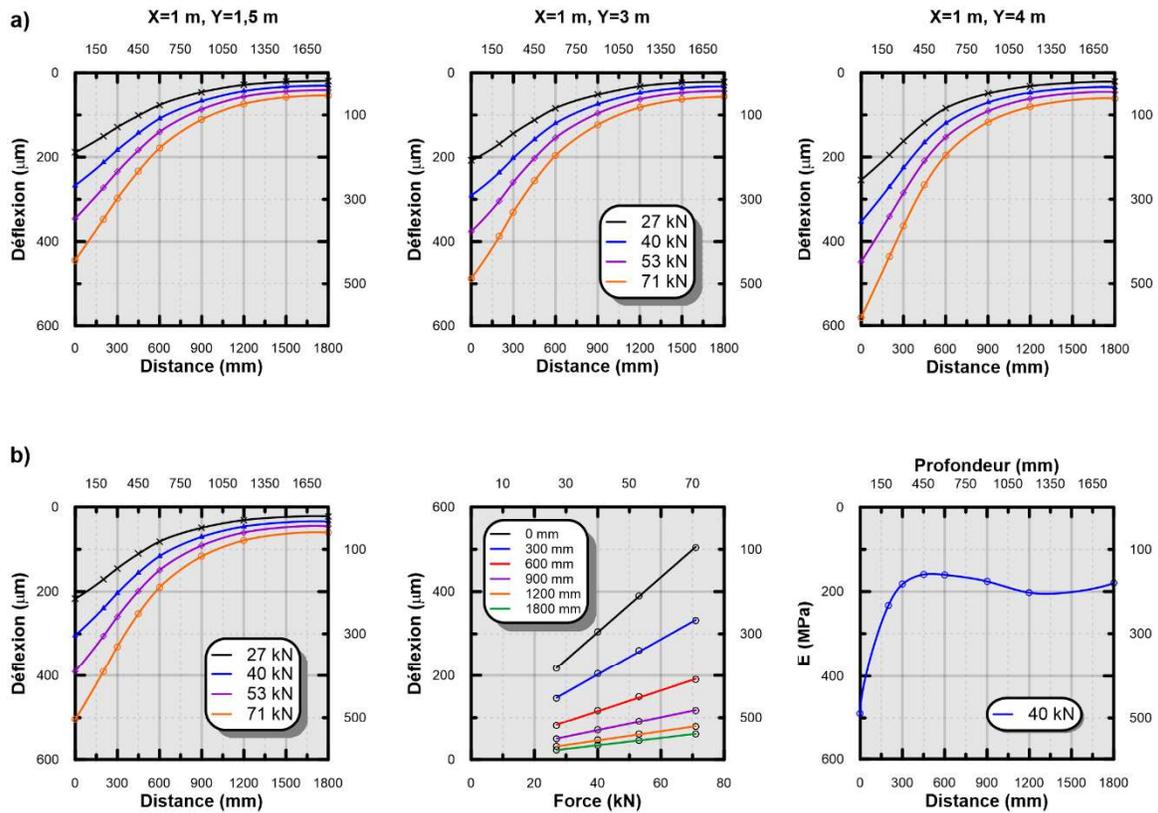


Figure 126. Résultats des essais FWD à la fin de l'essai : a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface

Le Tableau 17 présente un sommaire des principaux indices obtenus des bassins de déflexion à 40 kN corrigés pour la charge et la température. Des valeurs sont présentées pour les résultats obtenus à X=1500 mm et pour la moyenne des trois positions en X. Ceci s'explique par le fait que pour les résultats obtenus à X=3000 et 4000 mm à la fin de la séquence d'essais, l'enrobé comporte plusieurs caractéristiques pouvant affecter les valeurs et la moyenne (fissuration et rainure des parois du bassin de saturation). Ainsi, pour conserver une cohérence dans l'analyse durant la réalisation de la séquence méthodologique, il est possible d'utiliser les résultats obtenus en X=1500 mm. Le Tableau 18 fait état des modules élastiques estimés par le processus de rétrocalcul effectué avec le logiciel BAKFAA. Les modules élastiques ont été estimés pour des bassins corrigés à la charge de 40 kN et pour les mêmes cas que ceux traités dans le Tableau 17.

Tableau 18. Indices et paramètres obtenus de l'analyse des bassins de déflexion à 40 kN corrigés pour la charge et la température

	Post construction		Après Mégaphase E		Final	
	X=1,5 m	Moyen	X=1,5 m	Moyen	X=1,5 m	Moyen
SCI (μm)	111	116	95	101	89	106
	Rigide**	Rigide	Très rigide	Très rigide	Très rigide	Rigide
BDI (μm)	88	93	80	85	76	90
	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Rigide	Moyen
BCI (μm)	9	8	9	8	10	6
d_{1500} (μm)	32	33	30	30	33	40
	Rigide	Rigide	Rigide	Rigide	Rigide	Moyen
SIP (μm)	265	276	242	253	233	267
SIS (μm)	13	11	13	11	15	9
SN	5,4	5,3	5,6	5,5	5,7	5,4
E_{inf} (MPa)	118	137	118	138	95	

L'analyse des données du Tableau 17 montre que la condition structurale basée sur les différents indices a peu varié durant l'essai. Une rigidification de la partie supérieure de la chaussée est notamment observée entre l'état post construction et celui suite à la Mégaphase E. Cette rigidification est notamment observée par une diminution du SCI et du BDI, ainsi que par une augmentation du nombre structural. Les indicateurs associés aux couches profondes et au module du sol d'infrastructure varient peu. Les données de rétrocalcul (Tableau 18) montrent que cette rigidification est principalement attribuable à une rigidification du revêtement. Une première piste d'explication est que les données post construction ont été collectées quelques jours seulement après la fin des opérations de pavage alors que le bicouche d'enrobé était fraîchement mis en place. De plus, l'enrobé ayant été volontairement peu densifié, l'accumulation des passages durant la séquence méthodologique peu avoir modifié la condition structurale du bicouche. Finalement, des facteurs associés au vieillissement pourraient avoir également eu un impact.

La condition structurale a également peu évolué entre la fin de la Mégaphase E et l'état final. De façon générale, une certaine rigidification de la structure de chaussée est observée, mais celle-ci est combinée avec une légère diminution des caractéristiques structurales du sol. Ceci est attribuable au fait qu'il s'agit du moment où de l'eau a commencé à être ajoutée au système de

chaussée. Il a été observé que cela a eu un certain impact sur la teneur en eau dans la chaussée, notamment dans le sol d'infrastructure, ce qui semble se refléter faiblement sur la rigidité de ce dernier. Il est raisonnable de mentionner que les matériaux granulaires sont assez peu sensibles aux variations de teneur en eau dans la plage observée. De façon générale, tel que suggéré au Tableau 18, le module de la fondation se situe entre 284 et 308 MPa, celui de la sous-fondation entre 173 et 161 MPa et celui du sol d'infrastructure entre 152 et 135 MPa. Le module du sol d'infrastructure (Tableau 17) est quant à lui estimé à 118 MPa jusqu'à la Mégaphase E, mais une diminution à 95 MPa est constatée à la fin de l'essai. Il doit être noté ici que la valeur moyenne n'est pas présentée pour le module du sol estimé avec la méthode de Rohde, car la mesure finale pour le géophone à 1500 mm est affectée par la présence de la rainure d'insertion des parois du bassin de saturation pour l'un des points de mesure.

Tableau 19. Modules élastiques rétrocalculés avec BAKFAA

Couche	Épaisseur (mm)	μ	Module (MPa)					
			Post construction (T=18,5°C)		Après Mégaphase E (T=16,3°C)		Final (T=18,0°C)	
			X=1,5 m	Moyen	X=1,5 m	Moyen	X=1,5 m	Moyen
EB	147	0,35	2750	2697	4495	3871	4497	3283
F	235	0,35	284	301	308	301	289	256
SF	475	0,35	173	159	170	160	161	152
Sol	844	0,35	140	135	152	136	135	128
10-14	300	0,35	18	18	18	18	18	18
Béton		0,20	30000	30000	30000	30000	30000	30000

16 Suivi de l'orniérage pendant l'essai d'endommagement accéléré

Un suivi des profils transversaux a été effectué tout au long du projet avec une règle à ornière laser permettant d'obtenir l'élévation de la surface sur une distance transversale de 1800 mm. Le Tableau 19 présente le sommaire des mesures effectuées et le contexte dans lequel les profils ont été obtenus. De façon générale, dès qu'il y avait application de charges sur la chaussée, des mesures d'ornières ont été prises. Néanmoins, des mesures spécifiques ont aussi été prises, notamment le 15 janvier 2021 afin d'obtenir une référence pour l'état saturé, ou le 21 janvier 2021 pour obtenir une estimation du soulèvement au gel pouvant se produire lors du gel de la couche d'enrobé saturée. Le *Tableau 19* résume également l'accumulation des cycles et des ÉCAS lors des différentes phases d'essais. Un total de 209 513 cycles et 933 647 ÉCAS ont été appliqués, quasi exclusivement tous pendant la phase d'endommagement accéléré ayant débuté à la mi-février 2021.

L'essai d'endommagement accéléré s'est déroulé en appliquant pour deux niveaux de charges environ 100 000 cycles de façon continue en alternant la température entre 5 °C et -10 °C. Le *Tableau 20* fait le sommaire des conditions de charges et de l'accumulation des cycles pendant l'essai. Pour arriver à cumuler 100 000 cycles pour chaque niveau de charge visé (50 kN et 65 kN), deux cycles complets de gel et dégel ont dû être appliqués. À chaque fois que les températures étaient positives, de l'eau était appliquée sur la surface pour conserver les conditions humides. L'équipe de recherche a cherché à obtenir un équilibre approximatif proportionnel entre le nombre de cycles et la plage de température visée, qui s'étend sur 15 °C (5 à -10°C). Ainsi, environ 40% des cycles ont été appliqués pour une température plus grande que 0 °C, et environ 60% des cycles pour une température inférieure à 0 °C.

Tableau 20. Mesures d'ornières, accumulation du trafic et contexte de la prise des mesures

	MP	État	Cycles	ECAS	Cumulatif		Notes sur la mesure des profils transversaux
					Cycles	ECAS	
13 mars 2020	A	Sec					Mesures initiales suite à l'installation du simulateur
2 juin 2020	A	Sec					Reprises mesures initiales suite à l'installation du simulateur*
9 juin 2020	C	Sec	30	96	30	96	Mesures après passages à TI=20°C
19 juin 2020	D	Sec	30	96	60	192	Mesures après passages à TI=5°C
6 novembre 2020	E	Sec	30	96	90	289	Mesures après passages à TI=-10°C
15 janvier 2021	F	Humide					Mesures référence pour l'état humide
20 janvier 2021	G	Humide	10	9	100	298	Mesures après passages à 40 kN état humide
21 janvier 2021	G	Humide					Mesures avec l'EB gelé (prof. gel = 150 mm)
9 février 2021	G	Humide					Mesures profils post cycles thermiques gel et dégel en conditions humides
10 février 2021	G	Humide	20	32	120	330	Mesures profils après passages de référence à 40 et 50 kN
18 février 2021	G	Humide	48834	110144	48954	110474	Mesures profils après cycle gel et dégel #1 (50 kN)
2 mars 2021	G	Humide	50432	113748	99386	224222	Mesures profils après cycle gel et dégel #2 (50 kN)
10 mars 2021	G	Humide	57802	372354	157188	596576	Mesures profils après cycle gel et dégel #3 (65 kN)
8 avril 2021	G	Humide	52325	337071	209513	933647	Mesures profils après cycle gel et dégel #4 (65 kN)

*Suite à la fermeture des laboratoires en mars 2020

Tableau 21. Répartition des cycles et des conditions de charges lors de l'essai d'endommagement accéléré

Cycle	Date	Charge	CA*	T>0°C		T<0°C		Somme	
				(kg)	(ECAS)	N*	ECAS	N	ECAS
1	10 au 17 février 2021	5000	2,255	15029	33898	33805	76247	48834	110144
2	18 février au 1 mars 2021	5000	2,255	21301	48044	29131	65704	50432	113748
3	02 au 9 mars-2021	6500	6,442	22234	143229	35568	229125	57802	372354
4	10 mars au 8 avril 2021	6500	6,442	25900	166845	26425	170227	52325	337071
Total				84464	392015	124929	541303	209393	933318

* CA = Coefficient d'agressivité; N = Nombre d'applications de charge

Les ornières ont été mesurées sur six lignes transversales en position Y=1500, 2000, 3000, 3500, 4000, 4500 mm (Figure 128). Ces positions ont essentiellement été établies sur la base de questions logistiques. De façon générale, aucune mesure n'est prise aux extrémités de la fosse (1000 > Y > 5000 mm). De plus, la présence d'instruments près de Y=2500 mm ne permettait pas la prise de mesure.

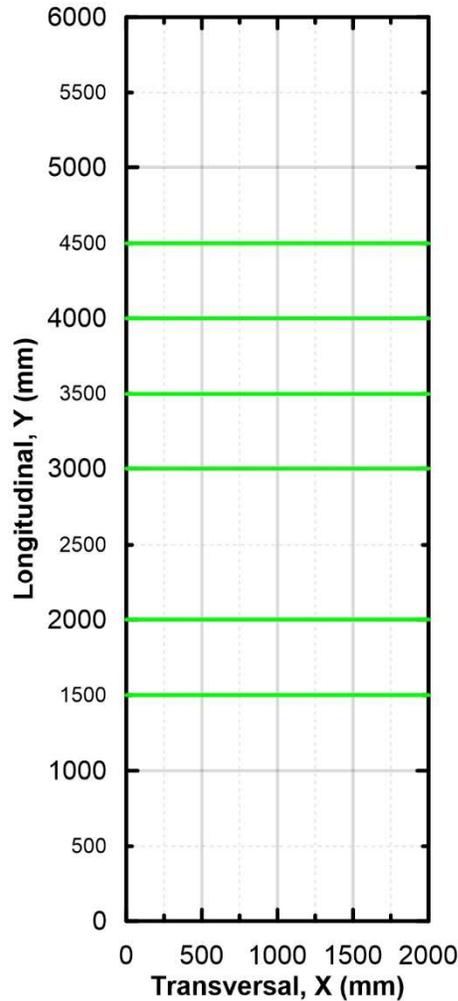


Figure 127. Lignes transversales suivies en orniérage durant les essais

La Figure 129 présente l'évolution des profils transversaux moyens durant les phases du projet. Il doit être premièrement noté que les étapes d'installations et de montage du simulateur impliquent de devoir utiliser le chariot chargé pour faire les tests et ajustements nécessaires au bon fonctionnement de la machine. Ils sont aussi nécessaires pour vérifier la réponse des instruments. Dans le cas particulier du montage du simulateur à l'hiver 2020, il doit aussi être rappelé que des travaux de maintenance et de réparation ont dû être effectués sur le moteur, des cycles supplémentaires de chariot ont donc aussi dû être effectués pour ces travaux. Tous ces cycles ont été effectués à température ambiante d'environ 20 °C et totalisent approximativement 200 cycles. Par conséquent, au début des essais où des chargements pour la mesure de la réponse ont débuté sur la chaussée expérimentale (MP C) (13 mars 2020), la chaussée montrait déjà

initialement des dépressions dans les sentiers de roues associées au nombre de répétitions de charges appliquées lors de l'installation du simulateur. Cela est en partie explicable par le faible niveau de compacité ciblé pour la couche de ESG10.

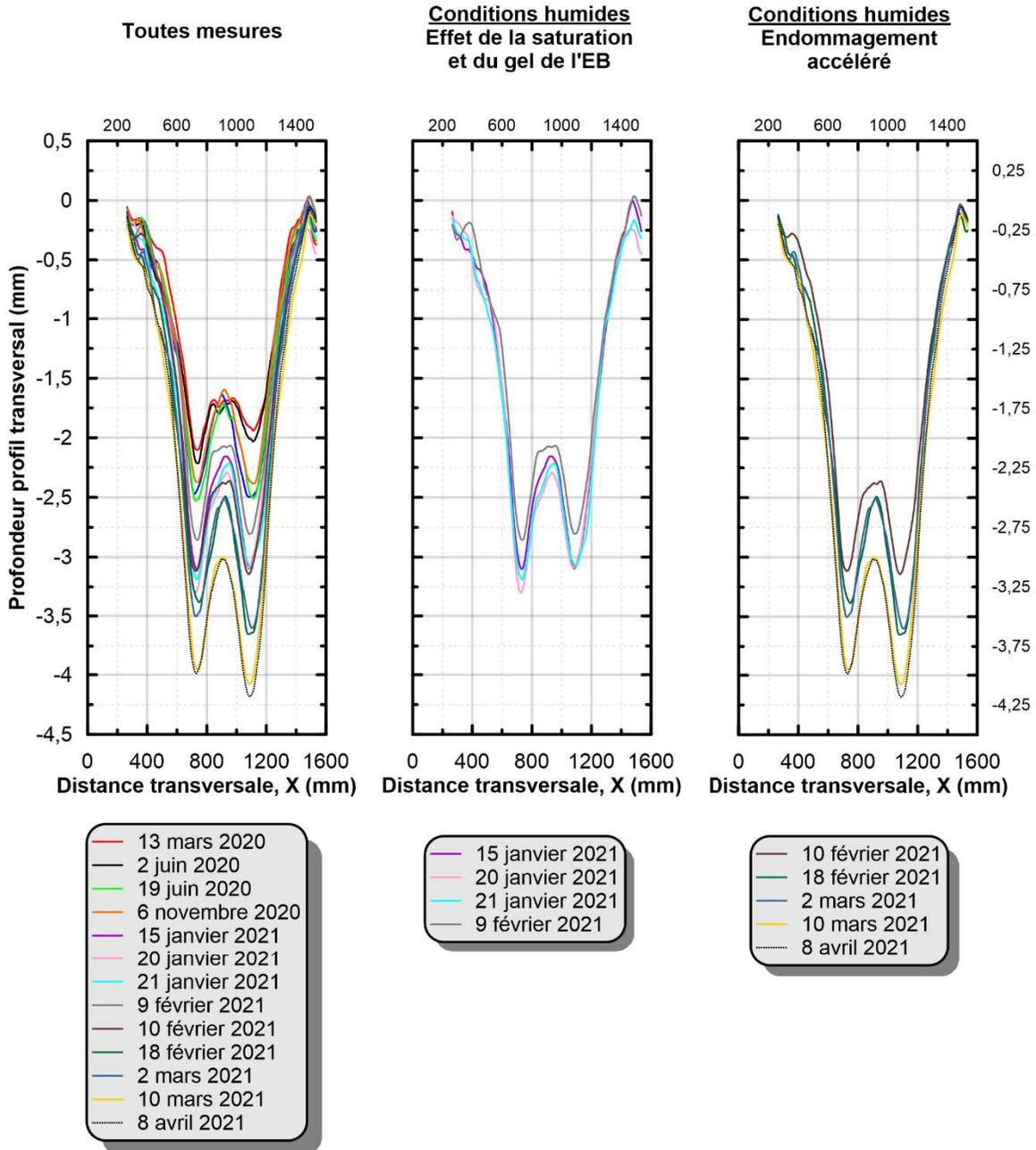


Figure 128. Évolution des profils transversaux durant les phases du projet.

Les profils transversaux présentés à la Figure 129 sont les profils moyens. Avant la MP C, soit le 13 mars 2020, des ornières moyennes de 2 mm sont présentes sur la chaussée. Toutes les MP avant l'essai d'endommagement accéléré ont conduit à une ornière moyenne de 2,9 mm. Ainsi, l'orniérage moyen net a augmenté de 0,9 mm durant les MP C à G, soit jusqu'au 9 février 2021. Tel que présenté au *Tableau 19*, les mesures d'ornières permettent de quantifier l'effet de l'augmentation de la saturation partielle sur l'accumulation de l'ornière dans l'enrobé (mesures comparatives entre le 15 et le 20 janvier 2021. Dans ce cas, l'ornière moyenne progresse de 3,12 mm à 3,23 mm suite aux passages de charges à 40 kN pour mesurer la réponse de la chaussée dans ces conditions. De plus, tel que présenté au *Tableau 19*, entre le 20 et 21 janvier 2021, une mesure de profil a été prise avant un cycle de gel et au moment où l'enrobé seulement était gelé, soit le moment où le front de gel avait atteint la base de l'enrobé. Cette mesure permet de quantifier le gonflement qui se produit dans le secteur des sentiers de roues qui pourrait être attribuable au gonflement de l'eau interstitielle. Les mesures ont permis de mesurer une diminution de la profondeur d'ornière de 3,23 à 3,15 mm, attribuable à la condition gelée du bicouche d'enrobé. La collecte des résultats à la *Figure 129* montre également que, suite aux cycles de gel et dégel en conditions partiellement saturées (MP G, avant l'essai d'endommagement accéléré), l'ornière moyenne était de 2,86 mm. Cette diminution de l'ornière est attribuable aux cycles de gel et dégel répétés qui ont affecté les matériaux de la structure de la chaussée avec la résultante correspondant à un léger soulèvement net.

La *Figure 129*, *Figure 130* et *Figure 131*, présentent les résultats spécifiques à l'essai d'endommagement accéléré. Tel que montré au *Tableau 19*, un total de 330 ÉCAS ont été appliqués pendant les différentes phases d'essais de type « réponse » durant le projet. Pendant l'essai d'endommagement accéléré, le nombre d'ÉCAS cumulatifs a atteint 933647. Entre le 10 février 2021 et le 8 avril 2021, l'ornière moyenne est passée de 3,16 mm et 4,11 mm. Ainsi, l'ornière moyenne a augmenté d'environ 1 mm pour essentiellement 933317 ÉCAS. L'analyse des données présentée à la *Figure 131* montre un taux d'évolution de l'ornière de $9,59 \times 10^{-7}$ mm/ECAS. Il doit être rappelé que ce taux d'évolution est obtenu pour une chaussée humide soumise à un cyclage thermique 5 ° à -10 °C.

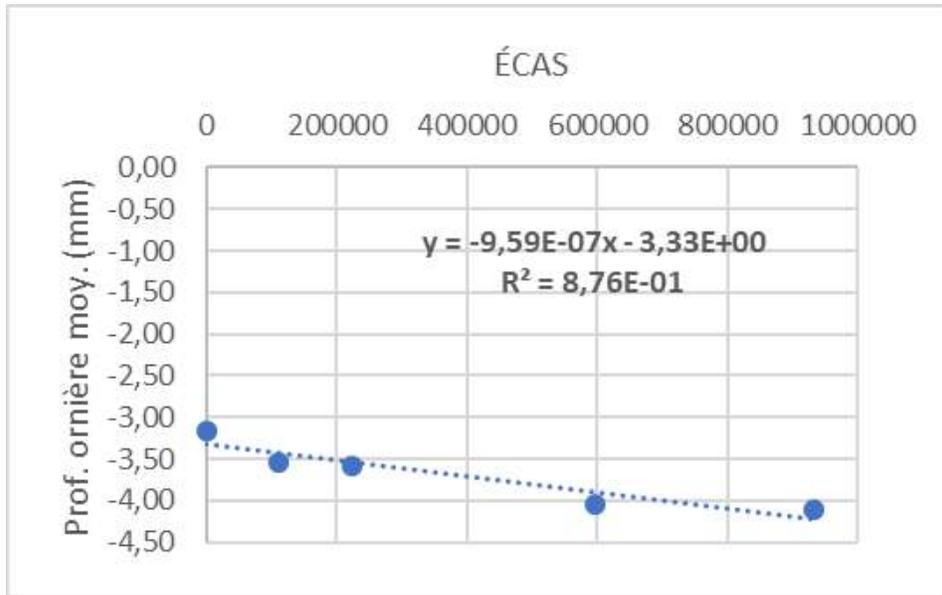


Figure 130. Évolution de la profondeur d'ornière moyenne en fonction des ÉCAS accumulés durant la phase d'endommagement accéléré

17 Auscultation destructive finale

17.1 Carottage

Des carottes de 100 mm ont été recueillies afin de mesurer directement la teneur en eau dans les couches de ESG10 et de GB20. La Figure 132 présente la position des quatre points de carottage. La position de ces carottes a été choisie pour avoir des mesures dans le sentier de roue, entre les roues et en dehors du champ d'action des roues, ainsi que dans l'objectif d'éviter les câbles et les capteurs qui auraient pu nuire à la précision de la mesure effectuée. Dans le cas de ces échantillons, le carottage a été effectué à sec. Les carottes recueillies ont également été sciées en deux sur l'interface, afin de prendre des mesures isolées pour chacune des couches du bicouche. Par conséquent, ces manipulations ont pu causer du chauffage local et affecter à la baisse la teneur en eau mesurée.

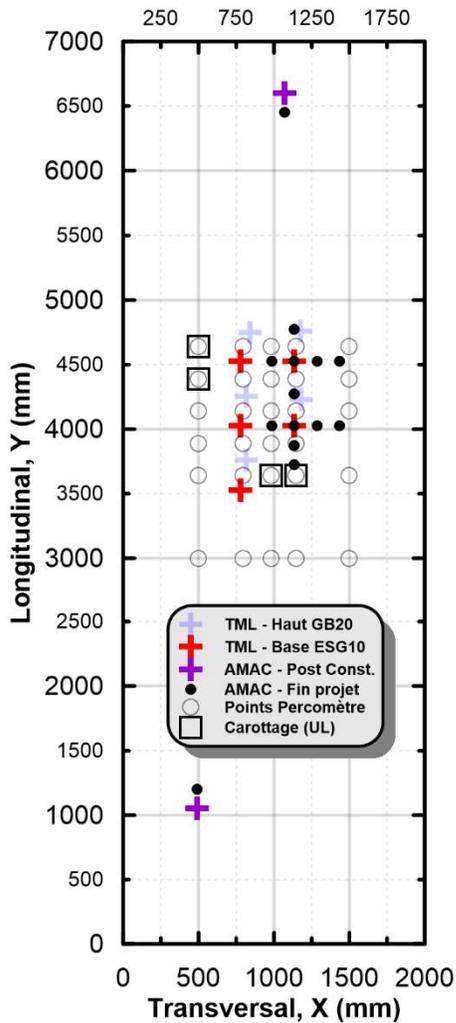


Figure 131. Position des points de carottage

Le Tableau 21 présente le sommaire des résultats obtenus pour les quatre carottes (C1 à C4). Les résultats sont séparés pour le ESG10 et le GB20. Afin d'estimer le degré de saturation, la valeur moyenne de pourcentage de vides (V_a) obtenues des essais de laboratoire est utilisée (7,89%). Des mesures ont également été prises avec le percomètre aux points de carottage afin d'estimer le S_r avant cette opération. Finalement, le Tableau 21 rapporte les valeurs moyennes et l'écart-type (É.-T.) pour les cas présentés. Les principaux constats qui ressortent au Tableau 21 sont les suivants :

- Il y a une présence significative d'eau autant dans la couche de surface (ESG10) que dans la couche de base (GB20);

- Le Sr obtenue avec les mesures sur les carottes est toujours plus élevé pour la couche de GB20;
- Les valeurs de Sr estimées avec le percomètre pour la couche de ESG10 sont plus élevées que celles obtenues par pesée;

Tableau 22. Résultats des mesures de teneur en eau sur les carottes recueillies à la fin de la séquence méthodologique

Carotte	Couche	X (mm)	Y (mm)	Mp* (g)	Mp+Mh* (g)	Mp+Ms* (g)	Dmm	Va (%)	w (%)	Sr (%)	Sr** (%)
C1	ESG10	500	4638	121,9	1379,5	1368,2	2,600	7,89	0,91	27,5	70,7
C2	ESG10	500	4388	122,2	1353,5	1337,6	2,600	7,89	1,31	39,7	75,1
C3	ESG10	980	3638	120,3	1277,3	1260,3	2,600	7,89	1,49	45,3	53,0
C4	ESG10	1145	3638	148,2	1352,9	1341,1	2,600	7,89	0,99	30,0	56,0
Moyenne										35,6	63,7
É.-T.										8,3	10,8
C1	GB20	500	4638	122,2	1472,0	1457,9	2,637	6,53	1,06	39,9	-
C2	GB20	500	4388	126,0	1614,2	1596,3	2,637	6,53	1,22	46,0	-
C3	GB20	980	3638	123,9	1541,3	1522,2	2,637	6,53	1,37	51,6	-
C4	GB20	1145	3638	152,0	1488,2	1465,6	2,637	6,53	1,72	64,9	-
Moyenne										50,6	-
É.-T.										10,7	-

*Mp=Masse du plat, Mh=Masse humide, Ms=Masse sèche

**Valeurs de Sr estimées avec le percomètre

La présence d'une quantité non négligeable d'eau dans la couche de GB20 est en accord avec l'hypothèse que, tel que préalablement discuté, l'eau arrivait à passer directement de la couche de ESG10 à la couche de GB20 en traversant l'interface. En effet, une quantité d'eau significative est mesurée dans la couche de GB20, avec une valeur moyenne du Sr de 50,6%. D'ailleurs, alors qu'il est supposé qu'une partie de l'eau s'infiltre via les bordures, les Sr les plus élevés pour la couche de GB20 se trouvent davantage vers le centre de la chaussée (C3, C4) et non près des extrémités latérales (C1, C2). Dans le contexte où la chaussée a été humidifiée très régulièrement (quasi quotidiennement) depuis décembre 2020, il est possible de croire que l'eau a pu également s'accumuler graduellement dans la couche de GB20 plus facilement puisque cette couche n'était

pas exposée aux cycles de mouillage et de séchage comme la couche de surface en ESG10. Il doit aussi être rappelé que, tel que mentionné, le chauffage induit par le carottage à sec et le sciage est susceptible d'avoir affecté significativement la teneur en humidité dans le matériau, les carottes étant difficilement manipulables à mains nues suite à leur extraction. Les manipulations et les délais entre l'extraction de l'échantillon et la pesée ont aussi pu causer une perte d'humidité dans les carottes. Cette perte d'humidité peut potentiellement être plus grande dans le ESG10 dû aux vides interstitiels plus élevés permettant à l'humidité de s'échapper plus facilement.

Une valeur moyenne de 35,6% a mesurée pour les carottes dans la couche de surface en ESG10. Encore ici, le carottage et le sciage ont pu influencer à la baisse les valeurs de S_r , estimées à 63,7% avec la méthode indirecte du percomètre. La moyenne obtenue par carottage est plus faible que celle estimée avec le percomètre. Les raisons associées à cet écart sont multiples. Premièrement, la profondeur d'investigation du percomètre est de l'ordre de 30 mm, alors que le S_r mesuré sur la carotte intègre l'épaisseur de la couche (environ 70 mm). Un gradient vertical de teneur en eau assez important peut exister dans la couche d'enrobé, mais celui-ci n'est pas documenté dans ce projet. Il est attendu que l'eau s'infilte plus facilement en surface et migre plus difficilement vers le fond de la couche. Deuxièmement, pour obtenir le S_r par carottage, la valeur moyenne des vides a été utilisée. Il est important de rappeler que les vides estimés dans la couche de ESG10 ne sont pas uniformes en plan, et ceux-ci ont pu évoluer entre la caractérisation initiale et l'état final. Il existe donc une variabilité dans la valeur qui affecte la valeur du S_r mesuré par carottage.

17.2 Essais AMAC

Des essais AMAC ont été réalisés à la fin de la séquence méthodologique. L'objectif de ces mesures était de vérifier si les conditions d'adhésion dans le bicouche d'enrobé et à l'interface avaient changées suite à l'action des cycles de mouillage, des cycles de gel et dégel et des passages de roues. Les essais finaux visaient plus spécifiquement deux endroits sur la planche d'essai. Le premier correspond à des mesures très près des mesures initiales afin de quantifier le changement d'adhésion entre les couches. Le second correspond au secteur des jauges TML 229 et 230 (base du ESG10, axe 2), où des signes de décollement ont été observés. La Figure 132

préalablement présentée indique les positions de mesures AMAC à la fin du projet. Pour des fins de référencement et de positionnement, la figure montre également la position des points AMAC initiaux (post construction), la position des jauges TML à la base du ESG10 et au sommet du GB20, ainsi que les coordonnées des points de mesure au percomètre. Il est notamment possible de constater que, pour les essais AMAC réalisés à la fin du projet, ceux-ci ont été positionnés autour des jauges TML 229 et 230 afin de faire un balayage transversal et longitudinal. La Figure 133 montre la position des essais AMAC et l'état de la surface après la réalisation de ces essais.

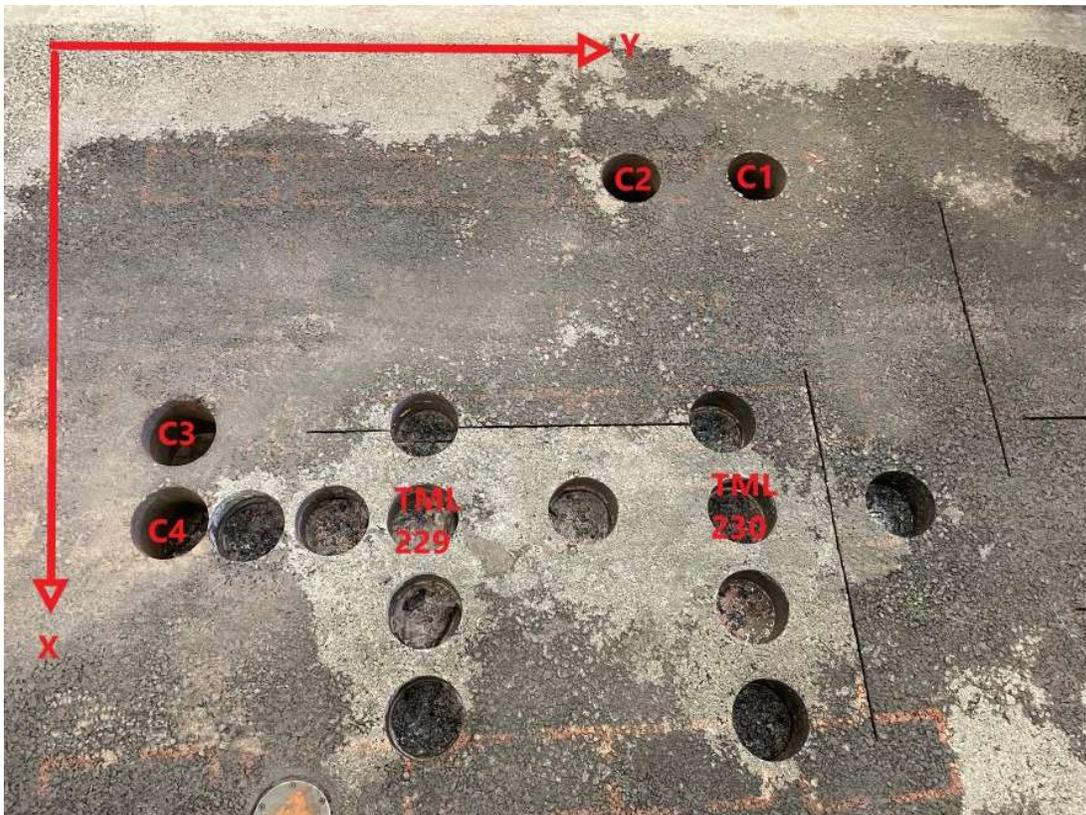


Figure 132. Position et réalisation des essais AMAC finaux

Les résultats obtenus pour les essais AMAC à la fin du projet sont présentés au Tableau 22 et à la Figure 134. La valeur moyenne de la contrainte maximale σ_{\max} pour les essais finaux est de 285 kPa. Il s'agit d'une valeur significativement plus faible que celle obtenue initialement qui était de 462 kPa. Il doit néanmoins être souligné que la valeur moyenne initiale a été calculée sur

seulement deux points, ce qui en fait une valeur donnant un ordre de grandeur. Il est aussi possible de constater que, pour les essais finaux réalisés très près des points initiaux, les valeurs montrent une diminution marquée entre l'état initial et final. La diminution est de l'ordre de 66% et 44%, soit une moyenne de 55%. Cette variation à la baisse de la contrainte maximale mesurée lors de l'essai AMAC peut potentiellement être attribuable, du moins en partie, aux conditions de teneurs en eau qui sont différentes et aux effets répétés des cycles de gel et dégel durant le projet. D'autres facteurs comme le vieillissement de la chaussée (facteur temps, effets climatiques et effets des charges) peuvent aussi entrer en ligne de compte. Il est entre autres possible de penser que l'adhésion entre les couches peut avoir été augmentée par l'effet des passages répétés de la roue dans l'axe 2. Néanmoins, cette importante diminution porte à croire que le niveau d'adhésion a fortement été influencé par les conditions environnementales imposées lors des essais. Afin d'obtenir un estimé grossier de la valeur moyenne initiale post construction pour la contrainte maximale, il est possible de procéder par extrapolation en utilisant le facteur de réduction moyen (55%) calculé sur les points de comparaison. Dans ce cas, la valeur de résistance moyenne de 285 kPa obtenue pour les essais finaux correspondrait à une valeur moyenne initiale post-construction de 633 kPa.

Tableau 23. Résultats des essais AMAC réalisés à la fin de la séquence méthodologique

T_{surf} (°C)	T_{inf} (°C)	X (mm)	Y (mm)	σ_{max} final (kPa)	σ_{max} initial* (kPa)
18,2	18,9	490	1200	188 (-66%)	546
18,6	19,2	1135	3725	492	
19,4	19,6	1135	3875	208	
19,2	19,4	985	4025	138	
19,2	19,2	1135	4025	257	
18,6	18,4	1285	4025	116	
18,4	18,2	1435	4025	413	
19,8	18,8	1135	4275	197	
18,8	18,8	985	4525	281	
19,8	18,8	1135	4525	412	
19,8	19,2	1285	4525	356	
19,2	18,4	1435	4525	316	
20,4	19,2	1135	4775	400	
18,4	19,2	1070	6450	212 (-44%)	378
Moyenne				285	462
Écart-type				116	

* Valeur initiale pour fin de comparaison avec les points pertinents

La Figure 134 présente la répartition spatiale des contraintes maximales dans le secteur des jauges TML 229 et 230. La possible perte d'adhésion, ou le décollement, suspecté dans le secteur de la TML 229 est supporté par les résultats des essais AMAC finaux. Il est constaté qu'il s'agit d'un secteur où les valeurs sont inférieures à la moyenne mesurée à la fin du projet. Le secteur contient également plusieurs sous-secteurs où les résistances maximales sont inférieures à la moyenne moins l'écart-type (donc inférieur à $285-116 = 169$ kPa). Par conséquent, il s'agit clairement d'un secteur où l'adhésion entre la couche de GB20 et la couche de ESG10 est faible ($\sigma_{max} < 200$ kPa). Les résultats, notamment la comparaison entre les conditions initiales et finales, tendent à confirmer que l'adhésion a fortement diminué pendant la séquence méthodologique. Cependant, bien que des indices de décollement et de perte d'adhésion ont aussi été observés pour la jauge TML 230, les valeurs de résistance maximale dans ce secteur sont plus élevées, près de la moyenne ou supérieures à la moyenne.

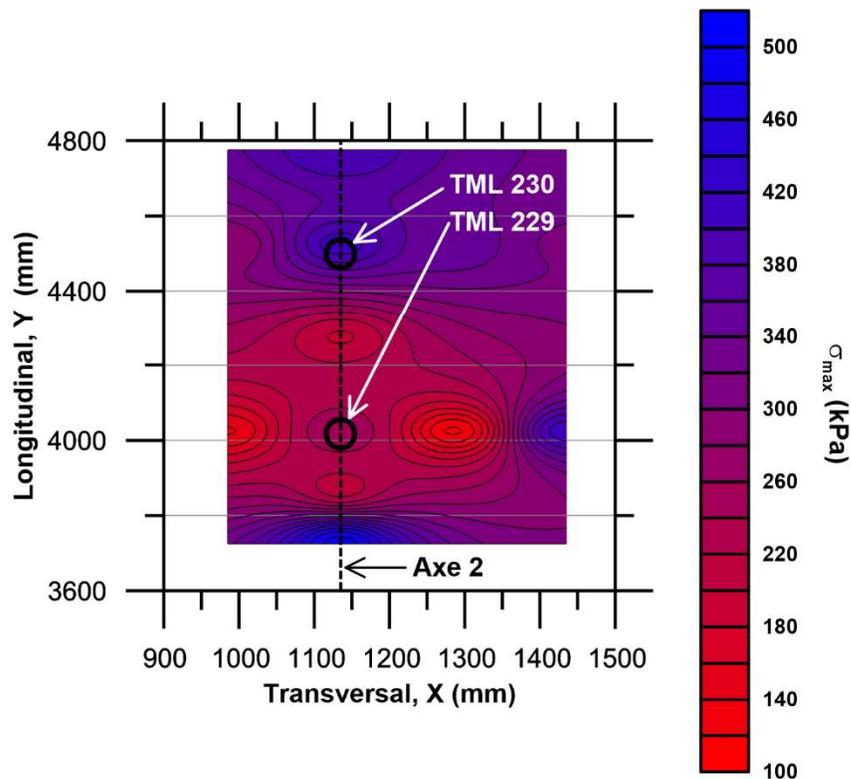


Figure 133. Répartition spatiale des contraintes maximales obtenues avec les essais AMAC à la fin du projet – Secteur des jauges TML 229 et 230

18 Récapitulatif des mesures d'auscultation recueillies pendant et à la fin de l'essai

Les sections 15, 16 et 17 présentent les principales mesures d'auscultation structurale avec le déflectomètre à masse tombante, le suivi de l'orniérage ainsi que le carottage et les essais AMAC réalisés durant l'expérience. L'ensemble de ces données apporte un complément d'information important pour appuyer plusieurs éléments de discussion sur le comportement mécanique de la structure de chaussée pendant l'essai, plus spécifiquement le comportement des couches d'enrobés bitumineux. Les principaux éléments à retenir de ces mesures sont les suivants :

- Les essais au déflectomètre à masse tombante réalisés durant les différentes phases du projet ont permis de constater que les conditions structurales de la planche

expérimentale sont demeurées relativement constantes durant l'essai. De façon générale, une certaine rigidification de la structure de chaussée est observée, mais celle-ci est combinée avec une légère diminution des caractéristiques structurales du sol, attribuable à l'augmentation de la teneur en eau dans le sol et les matériaux granulaires. Il doit être noté que la réalisation de ces essais a été effectuée de façon sporadique puisque l'utilisation du déflectomètre est difficile avec le simulateur en place;

- Des déformations de surface sous forme d'ornières se sont développées de façon limitées durant le projet. Les essais « réponse » (MP A à F) et l'essai d'endommagement accéléré (MP G) ont contribué chacun pour environ 1 mm d'orniérage en moyenne. Dans le cas des essais de type « réponse » (MP A à F), cette accumulation s'est surtout produite à températures plus chaudes. Il a néanmoins été observé que les travaux d'ajustement et de mise en place du simulateur entre décembre 2019 et mars 2020 (température d'environ 20 °C et chargement lent) ont créé des dépressions dans les axes de passage des roues qui étaient de l'ordre de 2 mm. L'essai d'endommagement accéléré a permis de mesurer un taux d'évolution d'environ 1mm/MÉCAS. Cette mesure a été obtenue sur chaussée humide par cyclage thermique entre 5 °C et -10°C. Un total de 933 319 ÉCAS a été appliqué, dont 541 303 pour $T < 0$ °C et 392 015 pour $T > 0$ °C;
- Les mesures à l'essai AMAC ont permis de montrer que les sollicitations thermiques et mécaniques imposées au système bicouche d'enrobé, combiné aux effets de la saturation partielle, ont affaibli la qualité de la liaison entre la couche de surface et de la couche de base après les cycles de gel et dégel. Notamment, des variations à la baisse de 44 et 55% ont été observées pour des points de mesure voisins de ceux des mesures initiales;
- Le secteur où une fissure semble affecter les mesures mécaniques, tel que posé comme hypothèse dans les modélisations, a pu être identifié par des mesures AMAC plus faibles de façon générale. Il s'agit d'un secteur où les valeurs sont inférieures à la moyenne mesurée à la fin du projet. Le secteur contient également plusieurs sous-secteurs où les résistances maximales sont inférieures à la moyenne moins l'écart-type. Dans ce secteur, l'adhésion entre la couche de GB20 et la couche de ESG10 est faible ($\sigma_{\max} < 200$ kPa);
- Le carottage final a permis de recueillir des échantillons et de mesurer la teneur en eau des couches d'enrobés par pesée et séchage. Les mesures ont permis de confirmer que

les enrobés, autant la couche de surface que la couche de base, avaient des degrés de saturation significatifs (36 et 51%, respectivement). Un écart non négligeable est observé entre les valeurs non destructives de degré de saturation estimées durant les phases expérimentales (percomètre) et les valeurs par pesage. Les opérations de carottage à sec et de sciage ont probablement influencé à la baisse les valeurs de degré de saturation obtenues par pesage, les carottes étant très chaudes suite à l'extraction et au sciage. Il doit être noté que le degré de saturation est plus élevé dans le GB20 que dans le ESG10, ce qui peut permettre de croire que l'eau passait au travers de l'interface malgré le fort taux de liant d'accrochage résiduel (0,3 L/m²). Cette possibilité a été soulevée lors de l'analyse de la réponse des capteurs de teneur en eau durant les premiers cycles de saturation avec le bassin.

19 Conclusion générale

L'étude décrite dans trois tomes, dont ce rapport est le troisième, visait à investiguer à échelle réelle la durabilité des couches de surface bitumineuses des chaussées routières sous l'effet de conditions climatiques froide et humide et sous trafic. Elle s'inscrit également dans le cadre de travaux de recherche effectués en France sur l'apparition subite et massive de nids de poule observées à l'occasion de périodes hivernales avec alternances jour/nuit de températures positives et négatives, de précipitations pluvieuses et emmagasinement d'eau dans les enrobés. Des essais réalisés à l'échelle du laboratoire et leur interprétation ont montré lors de travaux antérieurs que ces désordres pouvaient trouver leur origine, entre autres, dans les déformations de gonflement se produisant dans les enrobés partiellement saturés en eau dues à la transformation de l'eau en glace. La présente étude s'appuyant sur un essai en grandeur réelle réalisé à l'Université Laval tend à confirmer la réalité *in situ* de ces effets. Le projet réalisé est le fruit d'une collaboration entre le Ministère des Transports du Québec, l'Université Gustave Eiffel et l'Université Laval. Elle a reçu également le soutien de la DGITM (France), directement concernée par la thématique, qui a contribué au financement d'un postdoctorant, basé à l'Université Gustave Eiffel, pour le suivi et l'interprétation de l'essai. La collaboration a donné lieu à une mission au Québec d'un technicien en début de projet pour le partage de moyens d'essai et des compétences associées. D'autres missions prévues n'ont pu se réaliser en raison de la pandémie de Covid 19, qui a également conduit à allonger la durée du projet. L'étude prévue a néanmoins pu être menée à bien en conformité avec sa programmation initiale.

L'étude comportait un volet expérimental et un volet modélisation pour l'interprétation des nombreuses mesures récoltées au cours des différentes phases d'essai. Une chaussée expérimentale instrumentée comportant deux couches d'enrobé (ESG10 et GB20) a été construite dans la fosse du laboratoire de l'Université Laval. Après une phase préliminaire d'essais en condition sèche, celle-ci a été partiellement saturée. Des cycles thermiques, d'une durée de l'ordre de la semaine et avec des températures variant entre 5°C et -10°C, ont été appliqués en conditions sèche et saturée, avec ou sans les charges de trafic du simulateur routier. De nombreux résultats expérimentaux, essentiellement des mesures de température, de teneur en eau, de

déflexion et des mesures de déformation par jauges TML, ont été produits au cours des mégaphases d'essai et proprement répertoriés. Des campagnes d'auscultation complémentaires (FWD, carottages pour mesure de teneur en eau dans les enrobés, essais AMAC de résistance d'interface ESG10/GB20) ont également été réalisées en fin d'essai et pendant le démontage de la planche d'essai. Le volet modélisation a été effectué sur la base de calculs aux éléments finis (EF) 3D pour l'analyse de la réponse de la structure sous chargements thermiques et du logiciel ViscoRoute© 2.0 pour la réponse sous charges roulantes. Les calculs EF ont été réalisés en repartant d'un script, développé au sein de l'environnement Freefem++ pendant les travaux de thèse de Van Thang Vu (2017), qui couple la résolution de l'équation de la chaleur et du problème mécanique intégrant une loi de comportement thermoélastique avec déformation de gonflement due au gel. Des prolongements de ce script ont été effectués afin de tenir compte de façon approchée de conditions de frottement aux interfaces entre couches d'enrobés et entre GB20 et couche de matériau granulaire. La conjonction des mesures expérimentales et des simulations effectuées avec ces outils numériques a permis de comprendre l'essentiel du comportement de la structure aux cours des différentes phases d'essai.

Les principaux points de conclusion relatifs aux phases d'essai en conditions sèche et saturée, avec ou sans chargement mécanique, sont énumérés en Section 10.3 « Récapitulatif des principales observations faites en conditions sèches », en Section 13.6 « Récapitulatif des principales observations sur les cycles de gel-dégel en conditions humides sans charge mécanique », en Section 14.3 « Résumé pour la MP G avec passages de charges roulantes » et en Section 18.

En revenant plus spécifiquement sur les conséquences du gel en condition de chaussée humide, on peut retenir les faits suivants :

- De forts niveaux de saturation en eau dans les enrobés (de l'ordre de 70%) ont été atteints suite aux phases de mouillage de la structure par écoulement gravitaire assisté par la circulation du simulateur.

- La couche d'accrochage entre les deux couches d'enrobé n'a pas imperméabilisé la structure sous l'ESG10. La GB20 a également été partiellement saturée.
- Les matériaux granulaires ont également dû être le siège d'un écoulement en phase de mouillage mais possédait une teneur en eau initiale qui s'est conservée en début d'essai en condition de chaussée sèche.
- Les relativement longues phases de gel (plusieurs jours d'affilée) des cycles thermiques imposés à la structure se traduisent, aussi bien en conditions sèche et humide, par le gel des couches granulaires partiellement saturées et par un fort raidissement de celles-ci conduisant à de faibles niveaux de déformation de la structure sous charge roulante.
- La présence de déformation de gonflement par le gel des couches d'enrobé partiellement saturées est manifeste sur les mesures de jauges situées dans l'ESG10 et fort probable dans la GB20. L'interprétation de l'essai par simulation numérique permet d'estimer l'amplitude de gonflement au gel à environ $300 \mu\text{def}$ dans l'ESG10, sensiblement supérieure aux valeurs trouvées antérieurement en laboratoire à l'Université Gustave Eiffel pour des tests de gonflement libre effectués sur des matériaux typiques du réseau routier français. Au moment de la rédaction de ce rapport, de tels essais de laboratoire sur l'ESG10 et la GB20 de ce projet sont en cours à l'Université Gustave Eiffel pour comparaison aux valeurs estimées.
- La comparaison des mesures de jauges entre conditions sèche et humide montre que l'une des conséquences du gel dans les enrobés est la création de déformations différentielles entre couches. Pour retrouver ces effets, les simulations demandent à affaiblir le « frettage » entre ESG10 et GB20 traduisant un certain travail de l'interface.
- Certaines jauges TML ont détecté des réponses atypiques à partir du second cycle thermique réalisé en condition humide (sans charge mécanique) qui ne sont pas sans rappeler les observations préalablement faites en laboratoire sur bicouche d'enrobé.
- Ces signaux particuliers résultent sans doute de fissures et/ou délaminage locaux à proximité des jauges concernées. Leur analyse reste à préciser à ce jour.
- Les essais AMAC réalisés en fin d'essai dans cette zone montrent, par comparaison aux essais AMAC réalisés en début d'essai ou en fin d'essai à d'autres emplacements, une diminution significative de la résistance d'interface en liaison possible avec les trois points précédents.

- Toutefois, malgré les nombreux chargements mécaniques réalisés en condition humide et avec cyclage de la température, il n'y a pas eu d'apparition de dégradations en surface de chaussée, telle que la formation de nids-de-poule. Deux éléments ont pu jouer favorablement dans l'essai réalisé : (i) Les dégradations avancées et sévères comme les nids-de-poule sont plus typiquement observées sur des chaussées ayant quelques années de service et de vieillissement en conditions extérieures. Ce n'est évidemment pas le cas de la structure testée ici où les matériaux et la couche d'accrochage n'ont pas eu le temps d'évoluer; (ii) les phases relativement longues de gel de la mégaphase G ont entraîné comme déjà mentionné une forte augmentation de portance des couches granulaires et une forte atténuation dans ces conditions des effets mécaniques sous charges roulantes.

Les équipes de recherche de l'Université Gustave Eiffel et de l'Université Laval chercheront à valoriser conjointement au cours des prochains mois les résultats uniques de cette étude par le biais de publications dans des journaux et de présentations à des conférences. Les experts techniques des administrations au Québec (MTQ) et en France pourront être appelés à contribuer à ces exercices de valorisation.

20 Remerciements

Les auteurs désirent remercier les organismes ou intervenants suivants pour le soutien financier et/ou technique obtenu dans le cadre de ce projet : 1) Ministère des Transports du Québec et son équipe d'ingénieurs et de techniciens, 2) Direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM, France), 3) équipes techniques de l'Université Gustave Eiffel et de l'Université Laval, particulièrement Stéphane Bouron (UGE) et Sylvain Auger (UL).