

# **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 II DE III**

**Rapport présenté au  
Ministère des Transports du Québec**

**Par**

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

**Mars 2020  
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 II DE III**



## Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Contexte du projet.....	2
3	Revue de la documentation.....	6
3.1	Retours de terrain.....	6
3.2	Mécanisme pressenti d'apparition subite de désordres en surface de chaussée.....	9
3.3	Trame des recherches menées en laboratoire.....	12
3.4	Essais sur EB partiellement saturés.....	13
3.4.1	Préparation d'échantillons d'EB partiellement saturés.....	13
3.4.2	Essai de module complexe sur EB partiellement saturé d'eau, soumis au gel.....	16
3.4.3	Essai CTFS à dilatation libre (Cooling Test in Free Stress condition).....	17
3.4.4	Essai de retrait-gonflement thermique empêché sur EB partiellement saturé (TSRST : Thermal Stress Restrained of Specimen Test).....	21
3.5	Essai de gel/dégel sur bicouche.....	24
3.6	Travaux de modélisations numériques.....	30
4	Pré-essais en laboratoire sur les matériaux de la chaussée construite sur la fosse de l'Université Laval.....	36
5	Rappel sur les caractéristiques de la fosse expérimentale.....	39
6	Excavation de l'ancienne chaussée.....	43
7	Construction.....	44
7.1	Compactage.....	45
7.2	Collage du bi-couche.....	49
7.3	Stratigraphie et épaisseur des couches.....	50
8	Caractérisation des matériaux.....	59
8.1	Propriétés des matériaux et essais de caractérisation.....	59
8.2	Défectomètre portable.....	61
8.3	Compacité couches non liées.....	64

8.4	Compacité des enrobés .....	66
8.4.1	Mesure de la compacité par la prise de masse du camion .....	73
8.5	Récapitulatif des Va .....	75
9	Instrumentation.....	76
9.1	Thermistances .....	78
9.2	Cellules de contrainte .....	81
9.3	Défectomètre de surface et accéléromètre .....	84
9.4	Teneur en eau .....	86
9.5	Capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires .....	89
9.6	Capteurs de déformation longitudinales et transversales dans l'enrobé bitumineux.....	93
10	État des instruments .....	103
11	Essais sur la fosse .....	104
11.1	Essais au défectomètre à masse tombante (FWD) .....	104
11.2	Essais AMAC.....	107
12	Protocole d'essais .....	112
13	Conclusion .....	115
14	Références.....	116
	Annexe A.....	120
	Annexe B.....	122
	Annexe C.....	124
	Annexe D.....	128
	Annexe E.....	137
	Annexe F.....	141
	Annexe G.....	144
	Annexe H.....	149
	Annexe I.....	152
	Annexe J.....	174

## Liste des Figures

Figure 1. Rappels terminologiques.....	4
Figure 2. Formation subite de pelades et chapelets de nids de poule en période hivernale, ayant nécessité la fermeture de la voie au trafic (Mauduit et al., 2013) .....	5
Figure 3. Carotte prélevée à proximité de désordres de type pelade ou nids de poule (Mauduit et al., 2013).....	9
Figure 4. Schématisation du mécanisme de délaminage pressenti par déformations différentielles et champ d'autocontraintes générés par effet de gel.....	11
Figure 5. Schéma pour décrire le matériel utilisé pour la saturation des échantillons.....	14
Figure 6. Valeurs maximales de saturation obtenues en fonction de la porosité des éprouvettes (losanges noirs) et valeurs après différents temps d'exposition à l'air libre .....	15
Figure 7. Évolution du degré de saturation pour trois éprouvettes de porosité différente, en condition de drainage naturel, après sortie de l'enceinte de saturation.....	16
Figure 8. Effet du gel sur les isothermes à température négative, du module complexe des EB, partiellement saturés en eau ( <i>porosité</i> = 5,6%, <i>saturation</i> = 35 %)......	17
Figure 9. Vue d'ensemble dans l'enceinte thermique avec le barreau d'invar et l'éprouvette munie d'une jauge et d'une sonde de température .....	18
Figure 10. Essai de gel sur éprouvette non contrainte.....	20
Figure 11. Relation entre amplitude de gonflement linéique et teneur en eau volumique pour deux échantillons d'EB de porosités distinctes .....	21
Figure 12. Essai TSRST : Comparaison des réponses entre enrobé sec et partiellement saturé ..	24
Figure 13. Essais CTFS préalables aux essais TSRST de la Figure 12; Comparaison des réponses entre enrobé sec et partiellement saturé .....	24
Figure 14. Schéma d'instrumentation de l'essai bicouche (vue de face) .....	25
Figure 15. Dispositif expérimental pour la propagation de front de gel dans le bicouche; Le corps d'épreuve est placé dans un bac adiabatique muni en surface d'un serpentin assurant la circulation d'un réfrigérant et d'une plaque de diffusion thermique .....	26
Figure 16. Cycles de température imposés au niveau de la plaque d'acier; a) Cycle n°1 ; b) Cycles n°2 et 3 décalés de +5°C par rapport au premier .....	27
Figure 17. Températures T2, T3 et déformations corrigées de J2 et J3 sur bicouche sec .....	28
Figure 18. Essai sur bicouche partiellement saturé.....	29

Figure 19. Simulation thermique de l'essai CTFS .....	32
Figure 20. Simulation de l'essai TSRST. Comparaison entre EB sec (a et b) et EB partiellement saturé (c et d) .....	33
Figure 21. Comparaison entre les résultats expérimentaux (Exp) et numériques (Num) des essais; a) Évolutions des déformations CTFS ; b) Évolutions de contrainte axiale TSRST.....	34
Figure 22. Simulation de l'essai de gel/dégel sur bicouche saturé en couche supérieure .....	35
Figure 23. Pourcentages de vides obtenus sur la plaque d'enrobé bitumineux.....	36
Figure 24. Essais de laboratoire menés à l'IFSTTAR sur les matériaux de la fosse expérimentale	38
Figure 25. Essai de saturation gravitaire ; évolution du taux de saturation en fonction du temps (essai encore en cours à la date de rédaction de ce rapport).....	38
Figure 26. a) Fosse expérimentale et rampe d'accès; b) Vue de dessus de la fosse.....	40
Figure 27. Utilisation de pierre nette au fond de la fosse.....	41
Figure 28. Unités de conditionnement thermique pour la dalle de béton au bas de la fosse .....	41
Figure 29. Excavation de l'ancienne chaussée jusqu'à une profondeur Z=-825 mm.....	43
Figure 30. Remplissage de la fosse avec le tracteur hydraulique .....	44
Figure 31. Mise à niveau des couches avec des pelles et un râteau.....	45
Figure 32. Compactage à la plaque vibrante .....	46
Figure 33. Compactage au marteau vibrant utilisé près des instruments ou dans les secteurs non accessibles pour la plaque vibrante .....	46
Figure 34. Épandage de l'enrobé bitumineux à la surface – Exemple de la pose du ESG10 sur le GB20 .....	47
Figure 35. Compactage des couches d'enrobé au rouleau .....	48
Figure 36. Compactage des extrémités de la fosse avec une plaque vibrante .....	48
Figure 37. Mise en œuvre de la couche de liaison en sous-sections entre les deux couches d'enrobé .....	49
Figure 38. Émulsion bitumineuse mise en œuvre à la surface du GB20.....	50
Figure 39. Grille de coordonnées utilisée pour la mesure des profondeurs.....	51
Figure 40. Mesure des profondeurs par rapport à Z=0 mm.....	52
Figure 41. Profil du ESG10 obtenu de l'interpolation par krigeage.....	54
Figure 42. Profil du GB20 obtenu de l'interpolation par krigeage .....	55
Figure 43. Profil du MG20 obtenu de l'interpolation par krigeage .....	56
Figure 44. Profil du MG112 obtenu de l'interpolation par krigeage .....	57



Figure 45. Profil du sol d'infrastructure obtenu de l'interpolation par krigeage .....	58
Figure 46. Distribution de la taille des grains pour les matériaux granulaires et le sol d'infrastructure .....	60
Figure 47. Essai au LWD sur les couches mises en œuvre – Exemple de la sous-fondation .....	62
Figure 48. Position des points de mesure pris avec le déflectomètre portable.....	63
Figure 49. Position des points de mesures au nucléodensimètre pour les couches de matériaux granulaires et le sol d'infrastructure .....	65
Figure 50. Position des mesures au nucléodensimètre sur les couches d'enrobés .....	67
Figure 51. Interpolation spatiale par krigeage des vides interstitiels dans le ESG10.....	73
Figure 52. Pesée des essieux du camion .....	74
Figure 53. Position des différents instruments à l'exception des jauges de déformation dans l'enrobé .....	77
Figure 54. Installation des thermistances dans le sol et les matériaux granulaires, a) excavation dans le sol d'infrastructure, b) Positionnement de la thermistance au bas de la fosse, c) Installation des thermistances dans le sol.....	79
Figure 55. Chapelet de thermistances.....	80
Figure 56. Chapelet de thermistances installé dans l'enrobé bitumineux.....	80
Figure 57. Excavations locales pour l'installation des cellules de contraintes .....	82
Figure 58. Mise à niveau des cellules de contrainte .....	83
Figure 59. Déflectomètre de surface, a) Tête de mesure métallique collée, b) Potentiomètre fixé sur le couvercle.....	85
Figure 60. a) Accéléromètre PCB393B31, b) Insertion de l'instrument dans le trou de carottage.....	86
Figure 61. Installation de la sonde Decagon dans une excavation locale à la mi-couche dans la fondation .....	87
Figure 62. Tube d'insertion pour la sonde multiniveaux ProfileProbe .....	88
Figure 63. Capteurs de teneur en eau multiniveaux ProfileProbe (PrPr).....	88
Figure 64. Capteur de déformation verticale .....	89
Figure 65. Schéma des capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires .....	90
Figure 66. Excavation locale pour l'installation des capteurs de déformation .....	92
Figure 67. Capteurs de déformation verticale installés dans le sol d'infrastructure .....	93
Figure 68. Schéma des jauges TML.....	95

Figure 69. Jauges TML utilisées pour la mesure des déformations dans les couches d'enrobé ...	95
Figure 70. Installation des capteurs TML à la base de la couche de GB20.....	96
Figure 71. Installation des capteurs TML à la base de la couche de ESG10 .....	97
Figure 72. Moules de forme des jauges TML, a) vue de côté, b) vue de dessus .....	98
Figure 73. Moules de forme des TML lors du compactage du GB20 .....	98
Figure 74. a) Retrait des moules au sommet de la couche de base, b) Cinq empreintes de TML au sommet de la couche de base .....	99
Figure 75. a) Traçage des cavités pour les câbles, b) Nettoyage et brosseage des empreintes pour maximiser l'adhésion de la colle avec l'asphalte, c) Mise en place des jauges avec de la colle epoxy .....	100
Figure 76. Position des TML sur chaque horizon, a) à la base du GB20 (vert), b) sommet de la couche de GB20 (bleu), c) base de la couche de ESG10 (rouge).....	101
Figure 77. Positionnement 3D des jauges TML dans les couches d'enrobé bitumineux .....	102
Figure 78. Appareil FWD positionné au-dessus de la fosse en X=1000 mm et Y=2000 mm .....	104
Figure 79. Résultats des essais FWD, 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 .....	106
Figure 80. Foreuse du Ministère des Transports du Québec .....	108
Figure 81. Équipement de l'essai AMAC.....	109
Figure 82. Résultat du décollement du bi-couche obtenu lors de la réalisation de l'essai AMAC .....	110

## Liste des Tableaux

Tableau 1. Loi de comportement isotrope pour EB partiellement saturé .....	31
Tableau 2. Mesures de profondeurs et d'épaisseurs des couches lors de la construction .....	53
Tableau 3. Granulométries des formules d'enrobé bitumineux utilisés .....	59
Tableau 4. Caractérisation du sol et des matériaux granulaires .....	60
Tableau 5. Résultats des essais au déflectomètre portable .....	64
Tableau 6. Résultats des mesures de masse volumique au nucléodensimètre prises sur les couches de matériau granulaires et de sols .....	66
Tableau 7. Mesures brutes au nucléodensimètre sur les couches d'enrobés .....	69
Tableau 8. Facteurs de correction de la masse volumique au nucléodensimètre par comparaison avec les valeurs de laboratoire.....	70
Tableau 9. Mesures corrigées pour la masse volumique au nucléodensimètre .....	72
Tableau 10. Pesée du camion lors de la mise en œuvre du ESG10.....	74
Tableau 11. Récapitulatif des vides obtenus par trois méthodes dans les couches d'enrobé .....	75
Tableau 12. Position des thermistances dans les couches de sol et de matériaux granulaires....	78
Tableau 13. Position des chapelets de thermistances installés dans l'enrobé bitumineux.....	81
Tableau 14. Position et identification des cellules de contrainte dans la chaussée expérimentale .....	83
Tableau 15. Position des capteurs de teneur en eau .....	88
Tableau 16. Position, identification et propriétés des capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires .....	91
Tableau 17. Positions et informations sur les capteurs de déformation dans les couches d'enrobé .....	94
Tableau 18. Résultats des essais de déflexion.....	105
Tableau 19. Interprétation du bassin de déflexion moyen à 40 kN .....	107
Tableau 20. Résultats des essais AMAC .....	111
Tableau 21. Protocole pour les essais .....	113

## 1 Introduction

Dans les environnements soumis au gel saisonnier, comme c'est le cas au Canada, la performance des structures de chaussées flexibles est significativement affectée par les variations climatiques et l'interaction avec l'action des charges lourdes. Les nids-de-poule et les pelades sont des dégradations de chaussées retrouvées sur les chaussées flexibles souvent attribuées à l'action combinée du climat et des charges. En effet, bien que celles-ci soient retrouvées dans plusieurs types d'environnements et qu'elles ne soient pas exclusivement retrouvées en contexte climatique rigoureux, elles sont toutefois typiques des régions climatiques soumises aux cycles de gel et dégel. La genèse de ces dégradations fait l'objet de nombreuses recherches (Ghosh et al., 2018; Komba et al., 2010; Vu, 2017; Vu et al., 2017).

Ce rapport constitue le second livrable d'un projet collaboratif entre le Ministère des Transports du Québec (MTQ), l'Université Laval (UL) et l'Université Gustave Eiffel (UGE). Le projet de recherche s'inscrit dans le contexte où la France et le Québec cherchent à mieux comprendre les effets du gel et du dégel sur les chaussées et à intégrer efficacement la prise en compte de ces phénomènes climatiques dans le dimensionnement des chaussées, ainsi que pour la formulation et les exigences au niveau des matériaux. Plus spécifiquement, suite aux travaux réalisés à l'UGE, ce projet vise à étudier en conditions réelles et contrôlées les mécanismes conduisant à la formation de cavités dans la partie supérieure d'une chaussée, et à comprendre comment le gel/dégel, l'eau et les charges contribuent à la manifestation de ce type de dégradation.

Ce document présente une revue de la documentation sur l'action du gel et dégel et son effet sur les chaussées, la description et la construction de la section expérimentale qui sera testée en 2020, les instruments utilisés, ainsi que la mise à jour du protocole expérimental qui sera mis en œuvre pour le projet. Quelques premiers essais de laboratoire sont introduits et discutés, mais la majeure partie des résultats des études en laboratoire sera discutée dans le cadre du prochain rapport.

## 2 Contexte du projet

Les structures routières sont non seulement soumises aux sollicitations mécaniques de trafic, mais aussi aux sollicitations climatiques, qui tout en étant susceptibles d'affecter directement la sécurité et le confort des usagers, participent également à l'endommagement des chaussées.

Parmi les effets structurels d'origine climatique, ceux engendrés par les cycles de gel/dégel ont toujours suscité une attention particulière.

De nombreuses recherches ont ainsi été menées sur le comportement des sols-supports de chaussée et celui des couches granulaires non liées, susceptibles de gonfler et de se déformer en période de gel par transformation de leur eau porale en glace, ou susceptibles de subir de fortes pertes de capacité portante en période de dégel. Grâce à la bonne compréhension et connaissance de ces phénomènes, ceux-ci sont aujourd'hui maîtrisés au travers de sélections, formulations et traitements adaptés des matériaux constitutifs des chaussées et grâce à un ensemble de règles de « dimensionnement thermique », permettant aux structures de chaussée de jouer le rôle d'écran thermique afin de limiter la profondeur de pénétration de gel dans les sols.

Les effets mécaniques à long terme des cycles de gel/dégel sur les couches de surface (Figure 1) ont pour leur part généré moins de recherches, mais peuvent être considérés comme solutionnés en pratique au travers des travaux d'entretien routiers usuels et les renouvellements plus ou moins fréquents des couches de roulement ou de surface.

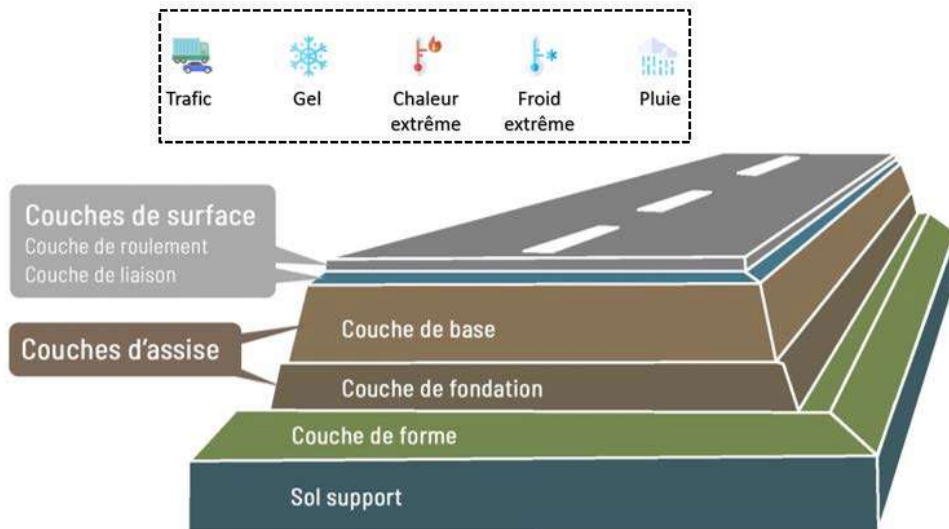
En revanche, la communauté routière s'est retrouvée plus démunie face aux désordres importants et subits, apparus à diverses reprises en surface de chaussée, au cours de certains hivers relativement récents en France. De tels événements se sont notamment produits dans le nord-est de la France et dans les pays limitrophes pendant les hivers 2005/2006 et 2009/2010. Les dégradations observées, ayant conduit jusqu'à la fermeture de voies au trafic, se traduisent par la formation de pelades et nids de poules en chapelet, touchant de grands linéaires de chaussée à l'échelle d'une région et se produisant en quelques heures seulement, sans signe précurseur (Figure 2). Elles ont suscité de la part des maîtrises d'ouvrage concernées des interrogations sur les causes d'apparition de tels désordres, sur la possibilité de déterminer à l'avance les chaussées les plus exposées à ce type de risque et sur les pratiques de réalisation ou

d'entretien des couches de roulement à proscrire ou à l'inverse à prescrire pour éradiquer le problème.

Le présent projet de coopération franco-qubécois s'inscrit dans ce contexte. Il fait suite à la réalisation d'enquêtes de terrain et travaux de recherche menés sur le sujet, ayant eu pour objectifs d'élucider les causes probables de ces désordres. Les retours de terrain et les recherches en laboratoire ayant conduit à incriminer le comportement mécanique au gel/dégel des enrobés bitumineux, susceptibles d'être le siège d'écoulements d'eau et d'atteindre des degrés de saturation relativement importants, il a été jugé nécessaire de tester l'hypothèse sur une structure de chaussée à échelle 1, faisant précisément l'objet de l'étude envisagée ici. Les possibilités de chargements mécaniques et thermiques accélérés offertes sur la fosse d'essai de l'Université de Laval se sont alors révélées tout à fait adéquates à la réalisation d'un tel essai.

Cette coopération poursuit par ailleurs une longue tradition de recherches communes partagées entre France et Québec dans le domaine des chaussées, portant notamment sur les effets des températures négatives. On peut du reste supposer que les résultats de la présente étude pourront avoir une portée plus large que celle liée à la problématique spécifique envisagée ici et permettront aussi d'améliorer de façon plus générale la tenue dans le temps des couches de roulement soumises à de nombreux cycles de gel/dégel.

(a)



(b)

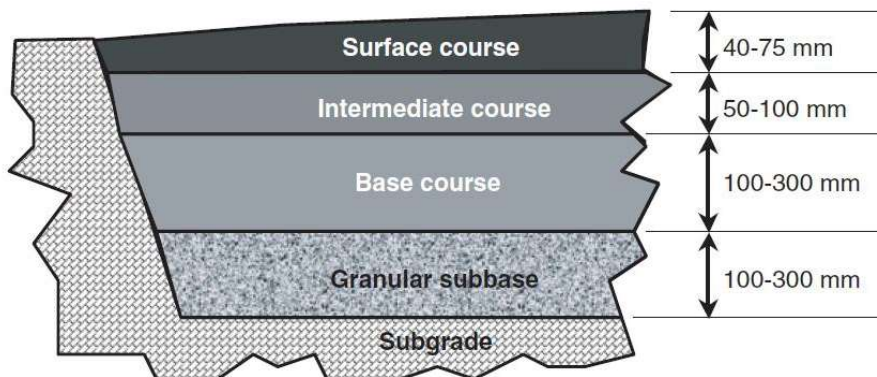


Figure 1. Rappels terminologiques

a) Dénomination française des couches de chaussée (<https://www.techniroute.fr/vos-routes>)

b) Dénomination anglo-saxonne (structures typiques, issue de (Jenks et al. 2011))



*Figure 2. Formation subite de pelades et chapelets de nids de poule en période hivernale, ayant nécessité la fermeture de la voie au trafic (Mauduit et al., 2013)*



## 3 Revue de la documentation

### 3.1 Retours de terrain

En France, l'hiver 2009-2010 a vu apparaître des dégradations d'une ampleur inhabituelle sur le réseau routier national, y compris sur certaines autoroutes concédées. Ces dégâts se sont essentiellement traduits par une apparition subite de nids de poule (souvent en quelques heures seulement), sous forme de chapelet, et de pelades (arrachements de la couche de roulement) sur des linéaires de route importants soumis aux mêmes aléas climatiques. Les nids de poules sont principalement localisés en bandes de roulement. Les carottages effectués au voisinage des zones dégradées montrent en partie haute de chaussée la présence d'eau dans la porosité des enrobés, des décollements d'interface et la décohésion de certaines couches avec un état de désenrobage important (notamment de la couche de liaison ou de l'ancienne couche de roulement) (Figure 3).

Les régions du Nord et du Nord-Est ont été les plus touchées avec un développement spectaculaire sur quelques itinéraires (A 28, RN 4). L'hiver a en outre provoqué de la fissuration et faïençage sur une partie importante des réseaux routiers de ces régions.

De tels désordres, présentant les mêmes caractéristiques de soudaineté sur de larges étendues, ont également été observés dans de nombreux autres pays soumis à des conditions climatiques hivernales plus ou moins rigoureuses (Amérique du Nord, pays du nord de l'Europe, ...).

Ces désordres engendrent de nombreux préjudices sécuritaires et financiers, directs ou indirects. Ils augmentent les taux d'accidents (souvent par suite de pertes de contrôle des véhicules) et d'incidents (ex : bris pneumatiques, trains de suspension, pare-brise, ...). Certaines voies doivent être fermées au trafic, entraînant des perturbations de la circulation. Les gestionnaires de réseaux routiers se voient devant la nécessité d'engager des réparations d'urgence sous trafic, puis des réparations préventives et des travaux de maintenance lourds après la saison hivernale.

Après l'hiver 2009/2010, les coûts dus aux dégradations hivernales des réseaux routiers sont ainsi estimés à plusieurs milliards d'euros sur l'ensemble des pays européens concernés (Allemagne, Belgique, Grande-Bretagne, France et Pays Bas). Environ 20% du montant total concerne les travaux d'urgence réalisés pour boucher les nids de poule. En Grande-Bretagne, les gestionnaires routiers ont dû faire reboucher plus de 1,2 millions nids de poule sur l'ensemble du pays pour 91 millions de livres sterling.

L'ampleur de ces désordres et spécialement leur soudaineté a déclenché en France un certain nombre d'enquêtes de terrain et de travaux de recherche, afin de mieux en comprendre l'origine et répondre aux interrogations soulevées par les gestionnaires sur les risques d'épisodes de cette nature sur le réseau existant, sur les modes de réparation les plus adaptés à court terme et sur la prévention possible de ces risques en profitant des opérations de maintenance et réfection périodiques des couches de surface, pratiquées sur le long terme.

Les enquêtes de terrain sur les observations faites en France ont été effectuées par le SETRA et le CEREMA avec l'aide d'exploitants (DIR et SCA).

### ***Importance des conditions météorologiques***

Pour les désordres apparus en 2009/2010, le contexte météorologique de la fin décembre 2009 apparaît comme l'élément déclencheur. Cette période a été caractérisée par des chutes de neige, suivies d'une période de froid sévère, puis d'un dégel rapide à partir du 21 décembre (point de départ de l'apparition des dégradations, de façon souvent extrêmement brutale).

D'autres périodes mêlant pluie, froid et neige ont suivi en janvier, février et mars. Des variations de température de l'ordre de 30°C en 48 heures ont été observées dans le Nord-Est de la France.

Au total, l'hiver a été plus rigoureux et plus humide que la moyenne (exemple 22 jours de neige contre 5 jours en moyenne pour une station en Ile-de-France). Il s'est trouvé particulièrement agressif pour les chaussées du fait de l'humidité conjuguée avec la multiplicité des cycles de gel-dégel et des interventions de viabilité hivernale (chaque salage occasionnant un choc thermique).

En Grande-Bretagne, le mois de février 2009 a été décrit comme le pire hiver des trois dernières décennies, avec des conditions glaciales et de fortes chutes de neige sur décembre, janvier et février. Ces conditions humides avec des alternances autour du zéro ont également été reconnues comme révélatrices de la fragilité du réseau routier (Alarm, 2010).

Le rapport d'étude du MTQ (Tremblay, 2006) recense et compare les fréquences statistiques de telles alternances pluie/gel pour un certain nombre de villes du Canada.

### ***Age et nature des couches impactées***

Le SETRA a également effectué une étude sur l'âge et la nature des sections dégradées en 2009/2010, recensées par les DIR les plus touchées (Est, Nord, Nord-Ouest et Ile-de-France). Les résultats agrégés sont fournis dans le rapport rédigé par les services du ministère (Pandarias, 2010). De manière synthétique, ils font ressortir les faits suivants.

S'agissant de l'âge des couches de roulement atteintes, le taux de dégradation est faible pour les couches de 1 à 5 ans (5%), puis augmente avec l'âge : 16% pour la tranche d'âge de 6 à 10 ans, 19% pour la tranche de 11 à 15 ans et 20% pour la tranche de plus de 15 ans.

S'agissant de la nature des couches de roulement (en excluant les chiffres les moins significatifs), les techniques les plus touchées sont les enduits superficiels (30%), les enrobés drainants (25%) et les enrobés de surface à module élevé (19%), puis les bétons bitumineux minces (15%), semi-grenus (12%) et très minces (10%). Toutefois, ces premiers chiffres doivent être pris avec beaucoup de prudence, notamment parce que la liste des sections dégradées ne hiérarchise pas la gravité des désordres et que la comparaison entre natures de couches ne tient pas compte ici de leur âge.

### ***Conclusion sur les retours de terrain***

Au final, les analyses de terrain mettent en évidence un rôle important de l'alternance entre pluies et gels, avec atteintes de températures relativement basses, sur le déclenchement brutal de désordres en couches de surface.

Le passage de véhicules au moment même où ces conditions météorologiques défavorables sont réunies, apparaît également avoir un effet sur le départ de matériaux, qui se produit essentiellement en bandes de roulement. Les sollicitations mécaniques apportées par le trafic viennent sans doute s'ajouter à une situation déjà critique presque partout.

Mais il est clair également que l'âge des revêtements et donc leur état d'endommagement impactent le phénomène, lorsque les circonstances du mécanisme déclencheur surviennent.

Il est plus difficile par contre de se prononcer sur l'importance de la nature des revêtements. Une large variété de techniques peut être impactée par l'apparition subite de graves désordres, ce qui montre dans un certain sens un caractère « universel » des mécanismes physiques en cause.



Figure 3. Carotte prélevée à proximité de désordres de type pelade ou nids de poule (Mauduit et al., 2013)

### 3.2 Mécanisme pressenti d'apparition subite de désordres en surface de chaussée

Les recherches menées en France sur le sujet (IFSTTAR, CEREMA) ont principalement été orientées vers la détermination et la compréhension du mécanisme déclencheur, non véritablement identifié jusque-là dans la littérature technique routière.

Un mécanisme aussi brutal ne peut être expliqué par des phénomènes de fatigue (en appliquant ici le terme aux couches de surface) usuellement rencontrés en Mécanique des Chaussées, qui par définition résultent de l'application de grands nombres de cycles de chargement (mécaniques et/ou climatiques) et d'un cumul de dommages. Ceci même, si comme on l'a vu, une fatigue préalable des couches de surface joue un rôle important dans le phénomène.

Pour le mécanisme de déclenchement à proprement parler, les faits penchent plutôt pour l'existence d'une cause à fort déterminisme, conduisant à des dommages importants en un très faible nombre de chargements.

Les recherches de laboratoire lancées sur le sujet en France ont ainsi assez vite été définies et organisées en fonction du « mécanisme pressenti », décrit ci-après.

Ce mécanisme repose d'une part sur l'hypothèse de déformations de gonflement induites par le gel dans un enrobé partiellement saturé en eau et sur un effet structurel au sein de couches de chaussée liées entre elles et soumises du fait du gel, à un jeu de déformations (horizontales) différentielles.

La première de ces hypothèses est naturelle. On peut en effet s'attendre à ce qu'un échantillon d'enrobé bitumineux, libre de se déformer et possédant une certaine porosité partiellement remplie d'eau, subisse comme la plupart des matériaux poreux, une déformation de gonflement par effet de gel, due à la dilatation entre eau liquide et glace (9% pour l'eau libre). La capacité de fluage des enrobés bitumineux peut être vue à cet égard comme facilitatrice du phénomène par rapport à un matériau purement élastique (à rigidité équivalente).

L'aspect structurel du mécanisme pressenti peut quant à lui, être schématiquement expliqué sur l'exemple d'un bicouche d'enrobés bitumineux partiellement saturé en eau, soumis à l'effet d'un front de gel se propageant du haut vers le bas. Considérons les figures 4b et 4c qui représentent les déformations supposées d'un tel bicouche pour un front de gel parvenu jusqu'au niveau de l'interface et ceci pour les deux types de conditions aux limites extrêmes suivantes : bicouche en appui simple sur support indéformable (Figure 4b), bicouche parfaitement collé sur ce même support (Figure 4c).

Compte-tenu du gonflement supposé induit par le gel dans la couche supérieure du bicouche, celui-ci va se déformer en condition d'appuis simples à la façon d'un bilame métallique thermique, qui se bombe sous l'effet d'un réchauffement lorsque le métal à plus fort coefficient de dilatation est au-dessus. Il y a analogie entre les dilatations différentielles induites par le gel dans le bicouche d'enrobés et celles induites par la température dans le bilame. Ce faisant les déformations en partie gênées des deux couches d'enrobés vont générer un champ d'autocontraintes, avec notamment création de forces d'arrachement et de cisaillement au niveau de l'interface, tendant à séparer les deux matériaux.

Mais cet effet est encore amplifié dans le cas du bicouche à déformation d'ensemble quasiment bloquée, représenté sur la figure de droite, plus représentative d'une structure de chaussée. En

assimilant les deux couches d'enrobés à des poutres élastiques, il est facile de montrer que cette configuration « à plat » ne peut exister que grâce à un jeu de moments de flexion et de forces horizontales ponctuels s'appliquant aux extrémités de l'interface. Remis dans le cadre de la Mécanique des Milieux Continus, ces efforts se traduisent par d'importantes concentrations de contraintes de cisaillement et surtout d'arrachement en extrémité du bicouche, propres à faire céder localement l'interface. Mais à supposer que ce mécanisme s'amorce et commence à créer deux fissures horizontales en extrémités d'interface, on peut montrer que celles-ci vont continuer à se propager jusqu'à se rejoindre au centre du bicouche et à séparer les matériaux. Autrement dit, le « moteur de fissuration », né des déformations différentielles entre matériaux, ne faiblit pas au cours de la délaminisation.

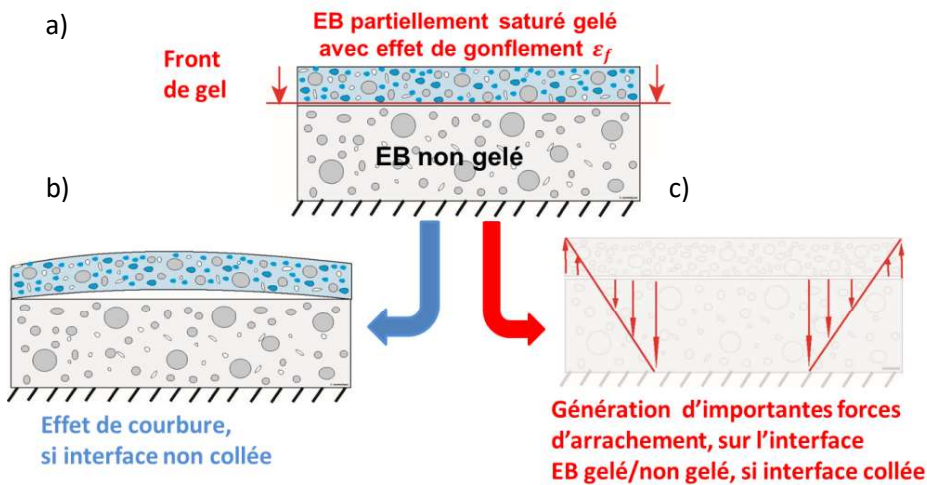


Figure 4. Schématisation du mécanisme de délaminage pressenti par déformations différentielles et champ d'autocontraintes générés par effet de gel

- a) bicouche d'EB partiellement saturé, avec front de gel parvenu au niveau de l'interface des deux couches
- b) courbure que prendrait la couche supérieure dans le cas d'une interface non collée et pour des déplacements horizontaux bloqués aux extrémités
- c) efforts d'arrachements internes générés en extrémités du bicouche dans le cas d'une interface collée ; ceux-ci peuvent être vus comme générant des moments venant fermer l'espace formé, sur la figure de gauche, entre les deux couches. Ces forces s'accompagnent également de contraintes de cisaillement concentrées en extrémités de l'interface, mais d'un ordre de grandeur a priori plus petit que les efforts d'arrachement

### 3.3 Trame des recherches menées en laboratoire

Le mécanisme décrit ci-avant a servi de guide aux recherches bibliographiques, expérimentales et numériques entreprises par l'IFSTTAR et le CEREMA sur le sujet. Elles ont été orientées de façon à tester les hypothèses émises et la pertinence du scénario d'ensemble.

Nos recherches ont ainsi été structurées en trois étapes.

La première étape a été axée sur l'étude en laboratoire de l'effet du gel sur la rhéologie des enrobés bitumineux partiellement saturés, sans nous intéresser spécialement à l'effet de répétition de cycles de gel/dégel. Deux points ont été examinés à ce stade : i) l'effet du gel sur le module complexe des EB, et surtout ii) l'effet sur leur déformation libre, de façon à vérifier et quantifier l'hypothèse de dilatation par formation de glace dans les pores du matériau.

La seconde étape en laboratoire a consisté à regarder l'effet « dual » du précédent, à savoir les contraintes développées lors du gel d'un échantillon d'EB partiellement saturé en eau, lorsque celui-ci est empêché de se déformer. On peut s'attendre d'après l'hypothèse formulée en déformation libre à voir se développer des contraintes de compression, exercées par la transformation liquide/glace au sein du matériau. Compte-tenu toutefois des propriétés de fluage et de relaxation des EB, la question est de déterminer l'intensité de ces contraintes, afin de savoir si celles-ci sont susceptibles d'induire des efforts significatifs par effet structurel, tel que mentionné en section 3.2.

La troisième et dernière étape a consisté à effectuer un essai sur bicouche d'EB, instrumenté, en effectuant quelques cycles de gel/dégel avec la condition de collage sur support rigide décrite sur la Figure 4. L'objectif était de vérifier directement en laboratoire la pertinence du mécanisme décrit en section 3.2.

Cette trame de recherche a notamment sous-tendu les travaux réalisés dans la thèse de Van Thang Vu (Vu, 2017) menée à l'IFSTTAR, sur laquelle nous nous appuyons essentiellement dans la suite de cette première partie du rapport.

Sur le plan bibliographique, il est à noter que la plupart des recherches menées sur les EB en présence d'eau sont en lien avec leur propriété de tenue à l'eau, en phase liquide, qui joue un

rôle essentiel dans l'obtention de matériaux de chaussée résistant à long terme aux sollicitations environnementales.

En revanche, la littérature comporte assez peu de références sur le comportement spécifique au gel/dégel des EB partiellement saturés. La plupart de ces études portent par ailleurs sur l'endommagement induit dans ces matériaux par l'effet de cycles de gel/dégel en nombre relativement élevé et en dehors de toute autre sollicitation mécanique. Parmi ces recherches, on peut notamment citer celles de (Özgan & Serin, 2013), (Xu et al., 2015), (Lamothe et al., 2015), (Pan et al., 2017), qui concluent dans leur ensemble à une quasi-absence d'effet de fatigue des EB par gel/dégel.

Ces résultats ne rentrent donc pas directement dans le champ d'investigation du mécanisme pressenti, pour lequel on recherche des causes à petit nombre de cycles de gel/dégel. Néanmoins, ils nous confortent dans l'idée que les causes de désordres subits en sommet de chaussée sont plutôt d'ordre « structurel » que purement « matériau ».

### 3.4 Essais sur EB partiellement saturés

#### 3.4.1 Préparation d'échantillons d'EB partiellement saturés

Les études expérimentales visées dans le cadre du programme de recherches défini ci-dessus ont nécessité de préparer dans leur ensemble des éprouvettes d'EB partiellement saturées, à différentes teneurs en eau. Il est à noter que l'obtention de valeurs précises de teneur en eau au sein d'un EB est un objectif délicat en soi, mais non véritablement nécessaire en général. Il convient surtout de savoir obtenir des degrés de saturation en eau bien différenciés et de mesurer *a posteriori* les valeurs obtenues avec précision par différence de poids entre éprouvettes sèche et saturée.

Dans le cadre des travaux de (Vu, 2017), les éprouvettes d'enrobé sont préparées au compacteur de plaques ou par essais PCG (presse à compaction giratoire), puis éventuellement sciées ou



carottées. Le choix des modalités de compactage permet de maîtriser les valeurs finales de porosité des échantillons (ex : de 4 à 15%).

Les éprouvettes sont placées après mûrissement dans une cuve remplie d'eau (Figure 5). Le récipient fermé hermétiquement est ensuite soumis à un vide poussé (ex : -84 kPa). En faisant varier la dépression et le temps de conditionnement (ex : 3 heures), on obtient alors des éprouvettes à teneur en eau distinctes.

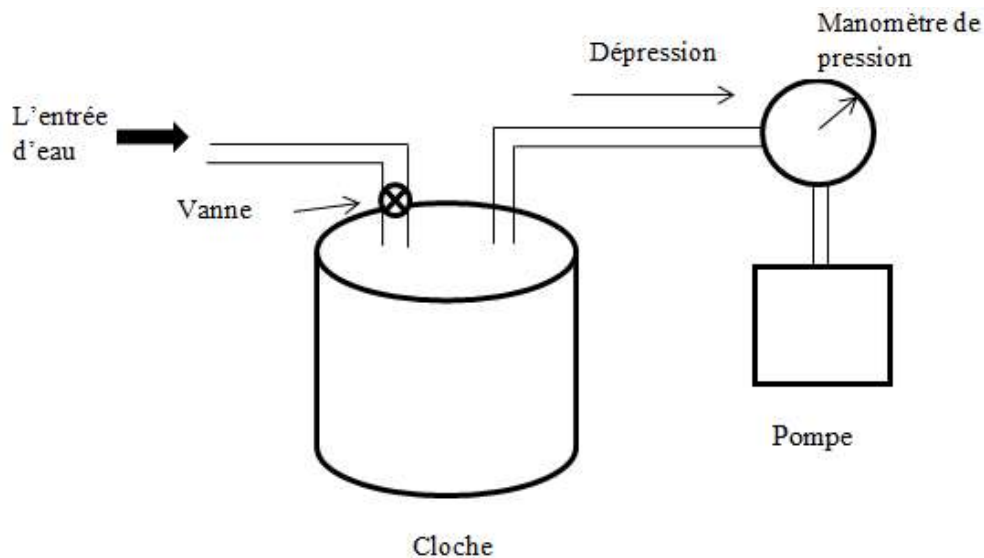


Figure 5. Schéma pour décrire le matériel utilisé pour la saturation des échantillons

La Figure 6 rassemble les différentes valeurs de degré de saturation maximales obtenues par  $V_u$  en fonction de la porosité des éprouvettes testées, immédiatement après leur sortie de la cuve (losanges noirs). La Figure présente également les degrés de saturation restant après un certain temps d'exposition de ces éprouvettes à l'air libre, afin de simuler les différents laps de temps susceptibles de s'écouler entre la fin des opérations de saturation et le début des divers essais effectués par la suite (Figure 7).

On distingue clairement sur les valeurs maximales de saturation atteintes l'existence d'un seuil de porosité, inférieur à 5%, pour lequel les taux de saturation restent en deçà de 20%. Dans cette gamme de porosité, la part des vides communicants est faible.

Dans la gamme intermédiaire de porosité comprise entre 7% et 9%, les degrés de saturation atteignent des valeurs maximales nettement plus élevées entre 50% et 80% immédiatement après sortie de la cuve.

Au-delà de 9%, ces valeurs rediminuent. Les vides communicants permettent d'emmagasiner une quantité d'eau plus importante (porosité  $\times$  saturation), mais cette eau s'évacue rapidement par gravité, avant même la pesée des échantillons.

Au-delà de 16h après sortie de l'enceinte de saturation, les éprouvettes de porosité comprise entre 5 et 12% de porosité se stabilisent aux environs d'une saturation de 40%.

Ces résultats rejoignent l'étude de (Terrel & Al-Swailmi, 1993).

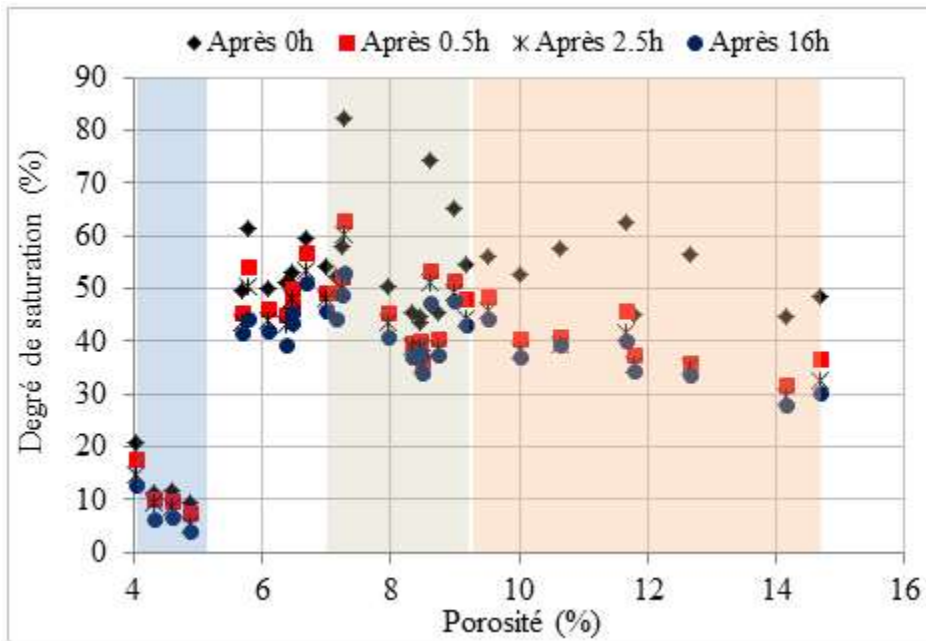


Figure 6. Valeurs maximales de saturation obtenues en fonction de la porosité des éprouvettes (losanges noirs) et valeurs après différents temps d'exposition à l'air libre

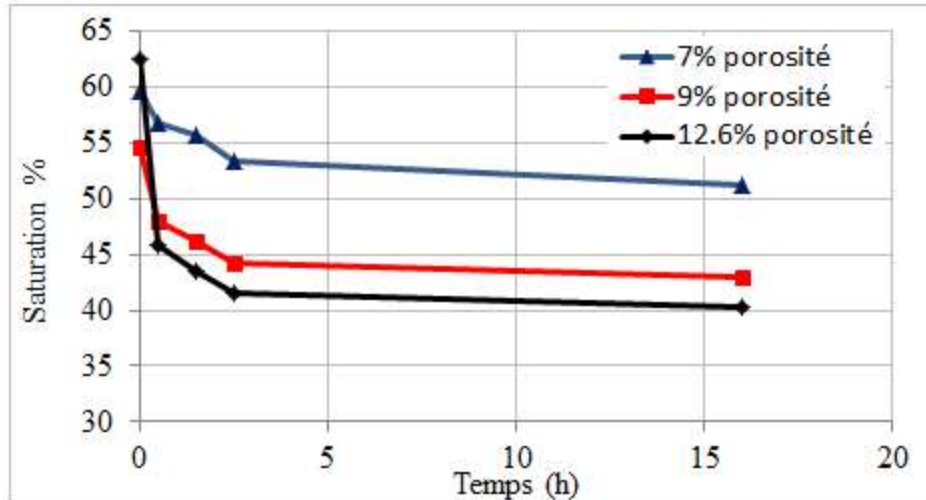


Figure 7. Évolution du degré de saturation pour trois éprouvettes de porosité différente, en condition de drainage naturel, après sortie de l'enceinte de saturation

### 3.4.2 Essai de module complexe sur EB partiellement saturé d'eau, soumis au gel

On peut trouver dans la littérature les résultats de divers essais de mesure de « module de rigidité » effectués sur EB partiellement saturés en eau, à l'état liquide (Lamothe et al., 2017). Ceux-ci ne mettent en évidence que peu de différences de mesure entre les mêmes essais réalisés sur EB sec ou partiellement saturé. La présence d'air dans les pores d'un EB non complètement saturé, qui limite les variations de pression d'eau contenue dans le matériau (par effet Skempton), justifie cette quasi-insensibilité du module des EB à la présence d'eau liquide.

Dans le cadre du mécanisme décrit en section 3.2, on peut alors se demander ce qu'il en est pour la rigidité d'un EB partiellement saturé, testé à température négative. La question n'est pas tant de s'intéresser en détail à cet effet additionnel éventuel, mais plutôt d'apporter la première preuve sur la base d'un essai standard (ex : mesures de module complexe) d'un effet significatif du gel sur la rhéologie des EB contenant de l'eau.

La Figure 8 présente dans le plan de Cole-Cole (partie imaginaire *versus* partie réelle du module complexe) les résultats d'une telle campagne de mesure, réalisée en flexion 2-points sur éprouvette trapézoïdale. Le matériau de porosité égale à 5,6% est testé à l'état sec, puis pour un degré de saturation de 35%.

Pour rappel, l'échantillon est porté au cours d'un tel essai à différentes températures s'échelonnant entre 40 et -10°C et sollicité pour chaque isotherme à un ensemble de fréquences comprises entre 0,5 et 30 Hz.

On observe que les réponses du matériau, à l'état sec ou partiellement saturé, sont identiques pour les isothermes positives. On retrouve ainsi le résultat signalé précédemment sur la quasi-insensibilité du module à la présence d'eau en phase liquide.

Par contre, un saut de module apparaît sur les mesures effectuées à -10°C, avec une rigidité plus forte de l'EB partiellement saturé. L'effet est relativement faible et non essentiel pour notre sujet. Il met néanmoins en évidence l'action effective et immédiate du gel sur le comportement des enrobés bitumineux au travers d'un supplément de rigidité apporté par la glace se formant dans les pores du matériau.

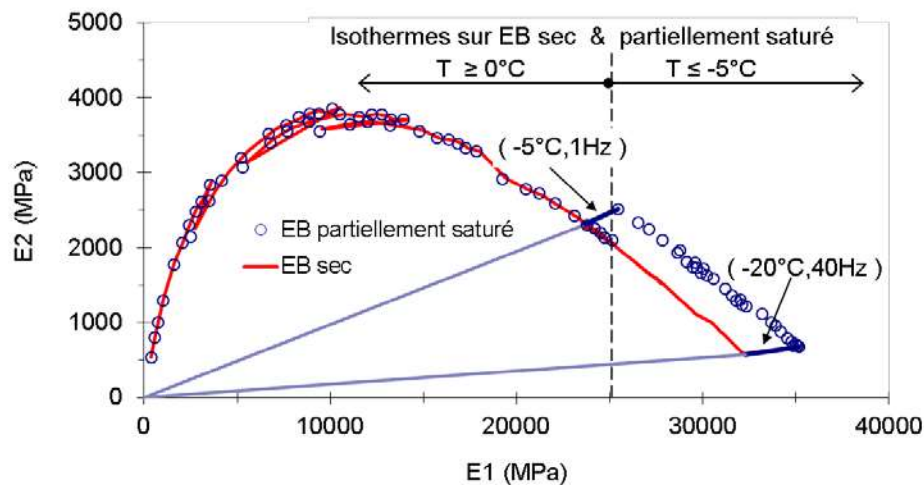


Figure 8. Effet du gel sur les isothermes à température négative, du module complexe des EB, partiellement saturés en eau (porosité = 5,6%, saturation = 35 %)

### 3.4.3 Essai CTFS à dilatation libre (Cooling Test in Free Stress condition)

Les essais suivant participent directement à l'explicitation du mécanisme de dégradation de chaussée recherché. Ils visent à vérifier l'hypothèse de gonflement des EB par gel de l'eau

contenue dans leur porosité et à quantifier l'amplitude du phénomène. Ils visent également à observer le comportement du matériau lors d'un retour à température positive et de la transformation inverse glace/liquide. Les essais sont effectués sur des éprouvettes d'EB cylindriques équipées de plusieurs jauges de déformation axiale et orthoradiale en périphérie. Les éprouvettes placées en enceinte thermique sont soumises à un faible nombre de cycles journaliers de température, comprise entre +10 et -10°C. Les mesures de déformation sont corrigées en température par référence à un échantillon d'Invar placé à proximité des échantillons dans les mêmes conditions de température. Une même éprouvette est testée à l'état sec et à différents degrés de saturation pour comparaison (Figure 10).

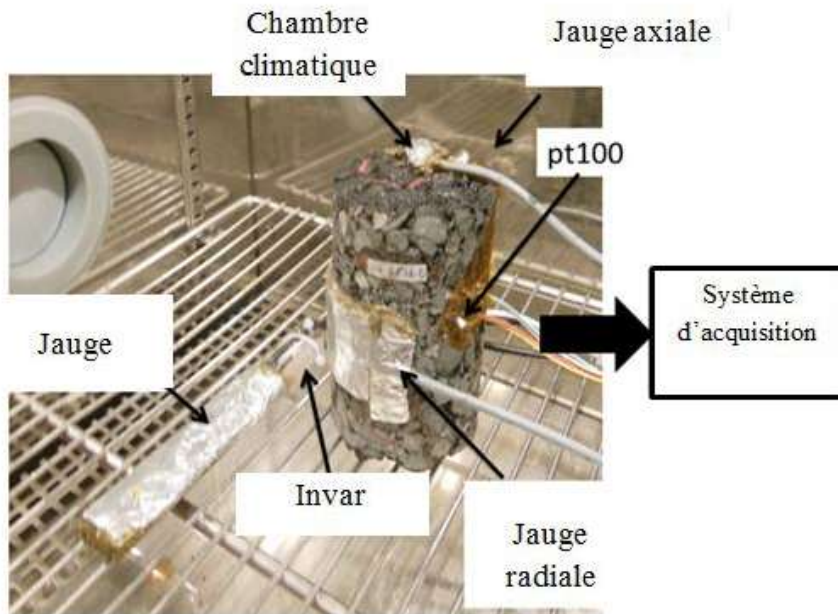


Figure 9. Vue d'ensemble dans l'enceinte thermique avec le barreau d'invar et l'éprouvette munie d'une jauge et d'une sonde de température

La Figure 10 rend compte des résultats typiques enregistrés au cours d'un essai, comportant une baisse de température de l'air dans l'enceinte de +10 à -10°C, suivie d'un plateau.

La courbe pointillée rouge montre l'évolution de la température mesurée en surface de l'éprouvette sèche (lecture sur l'échelle de droite).

Les courbes bleues, continu et pointillé, montrent les évolutions négatives, correspondant à des contractions, des déformations longitudinale et axiale mesurées (et corrigées) sur l'éprouvette sèche. Le zéro de déformation est effectué à la température initiale de +10°C. La quasi-superposition des deux courbes reflète l'isotropie des déformations thermiques. Les deux courbes, quasi-proportionnelles par ailleurs à la température (de surface) de l'éprouvette sèche, illustrent la linéarité des déformations thermiques avec la température. En notant que les déformations se stabilisent aux environs de -500  $\mu def$ , on obtient un coefficient de contraction thermique de l'ordre de 25  $\mu def/^\circ C$  ( $= -500\mu def/20^\circ C$ ) tout à fait conforme aux valeurs usuelles mesurées sur EB.

Les courbes noires, continu et pointillé, montrent quant à elles les déformations axiale et radiale mesurées sur l'éprouvette partiellement saturée.

Ces courbes se superposent à celles de l'éprouvette sèche jusqu'à des températures de l'ordre de  $-3^\circ C$ , ce qui traduit deux choses: i) un effet de surfusion de l'eau porale, qui reste liquide à température légèrement négative, ii) l'absence d'effet d'eau sous cette forme, sur la contraction thermique des EB.

En revanche, sur la plage de températures comprises entre -3 et  $-8^\circ C$  environ, l'éprouvette partiellement saturée présente clairement des déformations en extension, qui ne peuvent avoir pour origine que la propagation d'un front de gel à l'intérieur du matériau transformant au cours de sa progression l'eau contenue dans les pores en glace. Les évolutions des jauges axiales et orthoradiales se différencient au cours de cette phase, en raison de l'hétérogénéité de l'échantillon créée par la partition zone gelée/ zone non gelée. L'amplitude de la dilatation enregistrée par la jauge axiale sur cet intervalle de temps apparaît d'emblée de l'ordre de 100  $\mu def$  (variations de  $-400$  à  $-300 \mu def$ ).

Au-delà de cette phase d'essai, les déformations de l'éprouvette partiellement saturée se rejoignent et reprennent une évolution semblable à celles de l'échantillon sec, mais tout en étant décalées vers le haut du fait des dilatations survenues préalablement. Autrement dit, après transformation complète d'eau en glace, l'EB reprend un comportement de solide soumis à un simple effet de contraction thermique.

L'égalité retrouvée au cours de cette phase, des déformations axiale et radiale montre que la dilatation du matériau par effet de gel est un phénomène localement isotrope, en l'absence de contrainte imposée.

Le plateau de température imposé en fin d'essai permet par ailleurs de définir avec une bonne précision l'amplitude du gonflement lié au gel, par différence entre les déformations stabilisées de l'échantillon à l'état sec et pour le degré de saturation testé. Sur la Figure 10, l'amplitude de gonflement linéique ainsi trouvée est de l'ordre de  $+100\mu def$  (soit de  $300\mu def$  en volumique).

Plus largement, le plan d'expérience mené par (Vu et al., 2018) sur deux éprouvettes de porosités distinctes, chacune testée à plusieurs degrés de saturation, conduit à tracer la Figure 11, qui établit une relation quasi-linéaire entre la valeur du gonflement linéique induit par le gel dans un EB et sa teneur en eau volumique (porosité  $\times$  saturation).

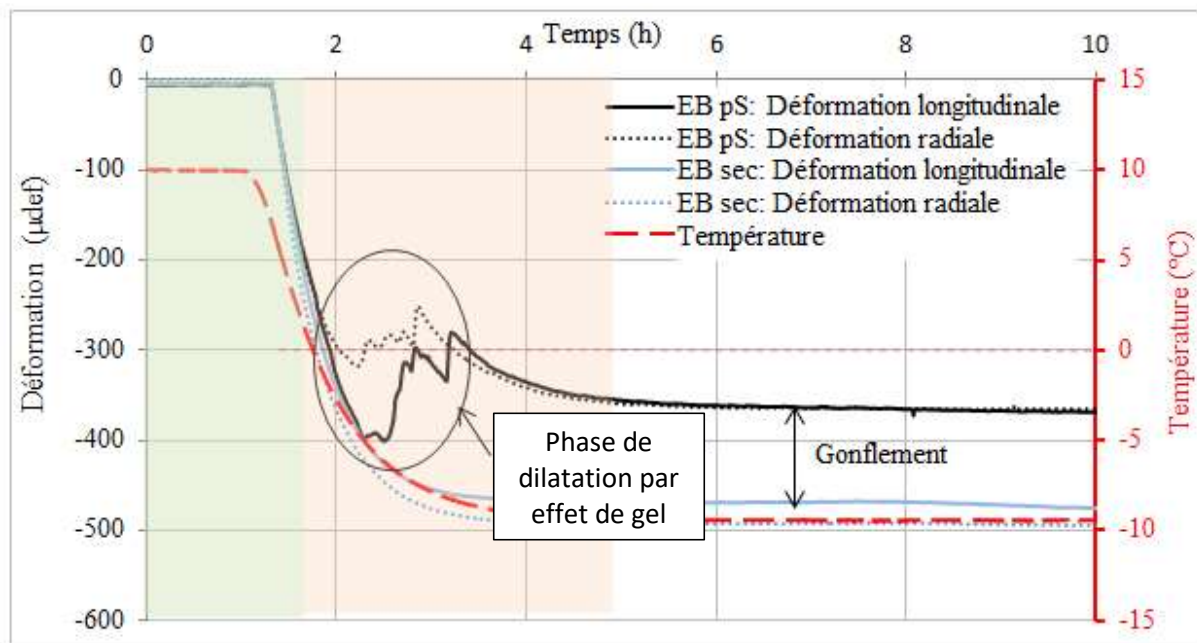


Figure 10. Essai de gel sur éprouvette non contrainte  
Évolution des déformations en condition sèche et partiellement saturée (porosité = 7,7%, saturation = 65%)  
En rouge, avec lecture sur l'échelle de droite : évolution de la température mesurée en surface de l'éprouvette sèche

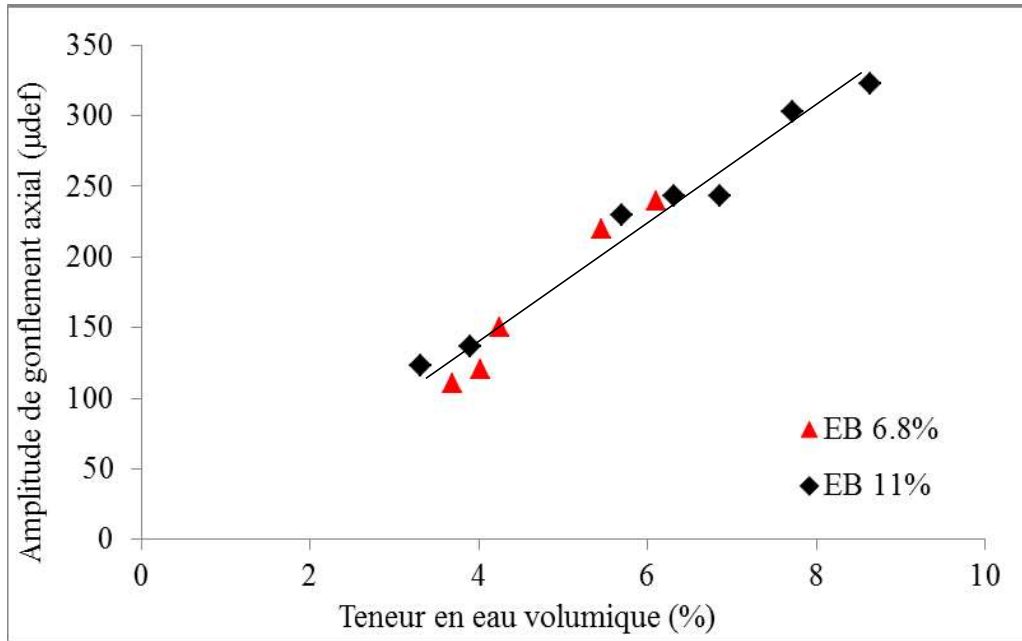


Figure 11. Relation entre amplitude de gonflement linéique et teneur en eau volumique pour deux échantillons d'EB de porosités distinctes

#### 3.4.4 Essai de retrait-gonflement thermique empêché sur EB partiellement saturé (TSRST : Thermal Stress Restrained of Specimen Test)

Les essais de type « retrait empêché » sont d'usage courant en Génie Civil pour évaluer la résistance des matériaux de construction à la fissuration par baisse de température, en condition extrême de déformation bloquée. Ils sont notamment utilisés en Mécanique des Chaussées pour spécifier la tenue au froid des liants bitumineux et des EB à l'état sec, en fonction de la valeur de température atteinte au moment de la rupture des échantillons.

Ces essais ont été repris dans le cadre des recherches considérées ici. Ils sont effectués sur EB secs et EB partiellement saturés. Dans le cas présent, l'objectif n'est pas de s'intéresser à la rupture elle-même des matériaux, mais aux contraintes développées en fonction de l'abaissement de température. On veut notamment vérifier si le phénomène de gonflement vu sur les essais CTFS se traduit à déformation bloquée par une inversion temporaire notable d'évolution de la contrainte axiale, propre à générer des champs d'auto-contraintes significatifs dans une structure bi-couche telle que décrite en section 3.2. La réponse ne découle pas directement en effet de



l'essai CFTS en raison de l'aptitude des EB à relaxer leurs contraintes, même si cette capacité est largement réduite à température négative.

Les essais réalisés dans (Vu et al., 2018) sont effectués selon la norme NF EN 12697-46. Les échantillons de forme cylindrique sont maintenus à déformation axiale bloquée (par référence avec un barreau d'Invar placé dans l'enceinte thermique), tout en étant soumis à une vitesse de refroidissement de  $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ . La force axiale nécessaire à assurer cette condition est tracée en fonction de la température de l'échantillon.

La Figure 12 présente les résultats d'essai typiques obtenus sur deux éprouvettes d'un même matériau, testé à l'état sec puis en état partiellement saturé (porosité  $\approx 6\%$ , saturation  $\approx 63\%$ ). Les éprouvettes ont préalablement été soumises à l'essai CTFS (non destructif) de façon à caractériser la déformation de gonflement en déformation libre du matériau (Figure 13).

La courbe (en noir) relative à l'EB sec présente de la droite vers la gauche l'évolution classique de la contrainte axiale de traction, mesurée à température décroissante. La contrainte reste quasiment nulle de  $+20$  à  $+5^{\circ}\text{C}$  en raison d'un faible temps de relaxation du matériau par rapport à la vitesse de sollicitation thermique ; elle augmente rapidement ensuite au fur et à mesure de la baisse de température et du raidissement du matériau et de l'augmentation de son temps caractéristique de fluage. Le matériau sec se rompt ici à la température de  $-20^{\circ}\text{C}$  pour une traction de l'ordre de  $+4\text{MPa}$ .

La courbe bleue présente l'évolution mesurée pour le matériau saturé à 63%. Celle-ci est confondue avec la précédente jusqu'à environ  $-3^{\circ}\text{C}$ , c-à-d tant que l'eau porale reste sous forme liquide, compte-tenu de l'effet de surfusion déjà constaté sur l'essai CTFS.

Entre  $-3$  et  $-10^{\circ}\text{C}$ , les variations de contrainte deviennent chahutées et négatives en moyenne. Elles aboutissent à  $-10^{\circ}\text{C}$  à une contrainte de compression de  $-0,5\text{MPa}$  environ. On observe donc à cette température une différence significative de contrainte de l'ordre de  $-1,5\text{MPa}$  entre l'EB avec eau ( $-0,5\text{MPa}$ ) et l'EB sec ( $+1\text{MPa}$ ) à  $-10^{\circ}\text{C}$ . Cet écart de réponses du matériau est bien entendu attribuable au gel de l'eau contenue dans les pores et est la contrepartie de la déformation de gonflement observée sur l'essai CTFS.

Au-dessous de  $-10^{\circ}\text{C}$ , l'EB partiellement saturé reprend une courbe d'évolution pratiquement parallèle à celle du matériau sec, mais avec un décalage vers le bas de l'ordre de  $1,4\text{ MPa}$ .

L'éprouvette rompant pour la même valeur de contrainte que celle atteinte par le matériau sec, il en résulte une température à rupture de  $-27^{\circ}\text{C}$ , sensiblement plus basse par conséquent que celle de l'EB sec.

La vue de ce seul résultat pourrait alors laisser penser à un effet bénéfique de l'eau sur le comportement au gel des EB. Mais tel serait le cas pour un mécanisme de rupture basé sur la fissuration thermique du matériau, ne correspondant pas au mécanisme structurel pressenti en section 3.2.

On retiendra donc essentiellement de cet essai que le « gonflement CTFS » vu sur matériau partiellement saturé se traduit bien par une contrainte significative de compression au cours de l'essai TSRST, malgré les propriétés de relaxation des EB, insuffisantes à résorber les efforts internes induits par la transformation liquide/solide de l'eau contenue dans les pores.

En rapprochant la valeur de gonflement linéique de  $150\ \mu\text{def}$  de l'écart de contrainte de  $1,5\text{ MPa}$ , respectivement mis en évidence sur les figures 12 et 13, il est intéressant d'observer que les deux quantités peuvent être mises en relation au travers d'un module de rigidité de l'ordre de  $10\ 000\text{ MPa}$ . En analogie thermo-élastique, le comportement du matériau saturé à 63% se traduirait au moment du gel par un module d'Young de  $10\ 000\text{ MPa}$  et une dilatation linéique de  $150\ \mu\text{def}$ .

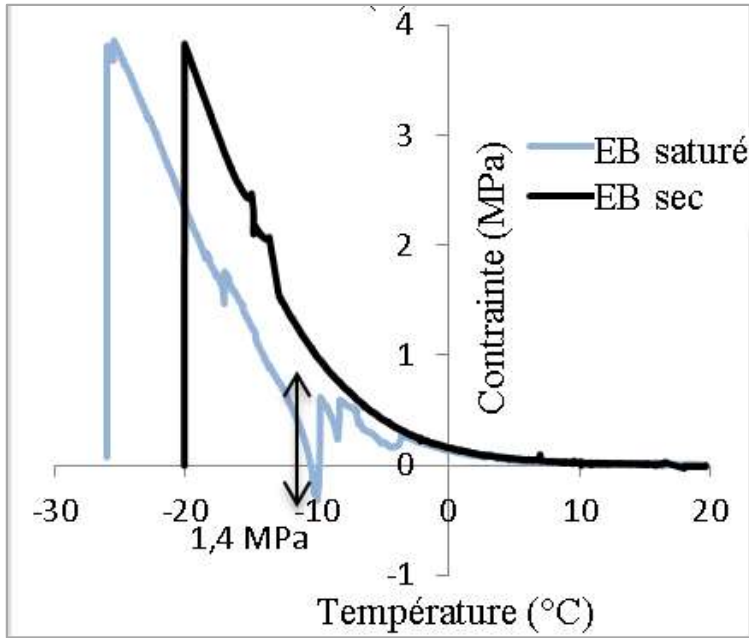


Figure 12. Essai TSRST : Comparaison des réponses entre enrobé sec et partiellement saturé

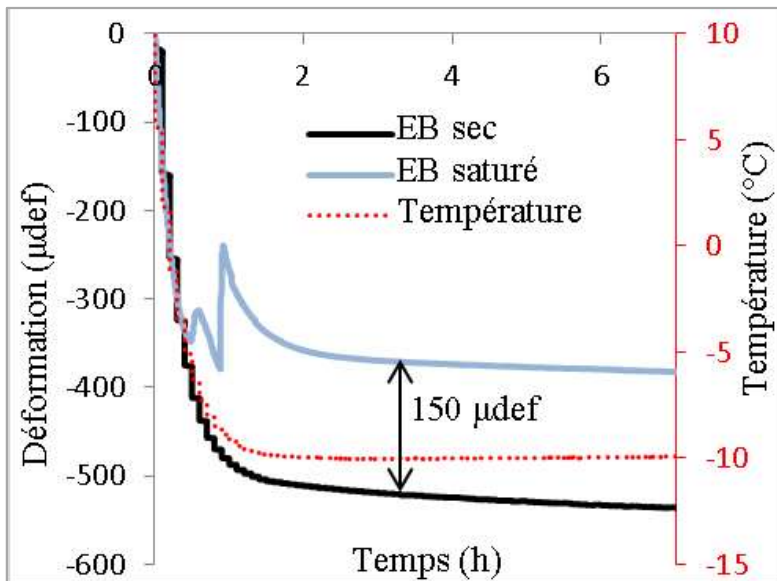


Figure 13. Essais CTFS préalables aux essais TSRST de la Figure 12; Comparaison des réponses entre enrobé sec et partiellement saturé

### 3.5 Essai de gel/dégel sur bicouche

Compte-tenu des résultats des essais de gel à déformation libre (CTFS) et à déformation bloquée (TSRST) confortant les hypothèses de la section 3.2, un essai de laboratoire sur bicouche a été effectué dans le cadre de la thèse de Vu (Vu et al., 2020).

### **Protocole d'essai**

Le corps d'épreuve est constitué de deux plaques d'EB (BBSG 0/14) superposées et collées entre elles. Les couches supérieure et inférieure ont respectivement des porosités de 8,1 et 4,7%. La couche d'accrochage est constituée d'une émulsion à 61% de teneur en liant et dosée à  $300\text{kg}/\text{m}^2$  de liant résiduel. La structure bicouche est elle-même collée sur une plaque en marbre avec la même émulsion et le même dosage. L'instrumentation est composée de jauges extensométriques (corrigées par différence avec barreau d'Invar) et de capteurs de température positionnés à environ 1cm de part et d'autre de l'interface entre les deux couches d'EB ( Figure 14).

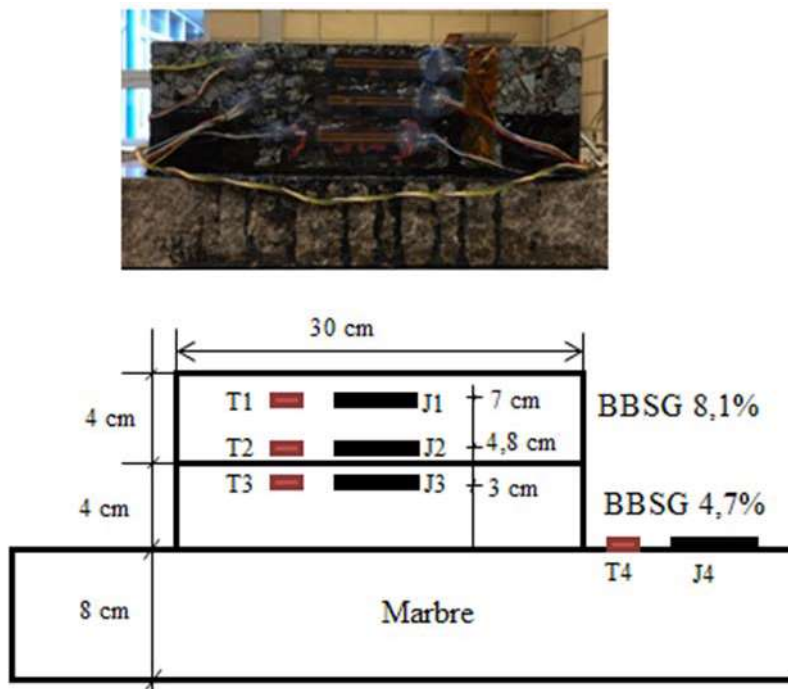


Figure 14. Schéma d'instrumentation de l'essai bicouche (vue de face)

Un bac muni d'un dispositif de froid en face supérieure et isolé thermiquement à sa base et sur ses parois permet de soumettre le corps d'épreuve à des historiques de température prédéfinis,

mesurés sur la plaque de diffusion thermique en acier. Ces historiques sont ici constitués d'une succession de trois cycles de gel/dégel, similaires à ceux de la Figure 16.

Le corps d'épreuve est testé une première fois à l'état sec pour le cycle de température n°1 représenté sur la Figure 16a.

Il est ensuite saturé en partie haute suivant le protocole décrit en section 3.4.1. Afin d'accentuer le mécanisme que l'on cherche à mettre en évidence, la couche inférieure d'EB déjà de faible porosité est enduite sur ses faces verticales d'un film de bitume afin de limiter sa saturation. La couche supérieure de porosité 8,1% est saturée à 70%. Ces conditions peuvent représenter une situation de couche de roulement saturée par infiltration d'eau de pluie et (partiellement) imperméabilisée à sa base par une couche d'accrochage.

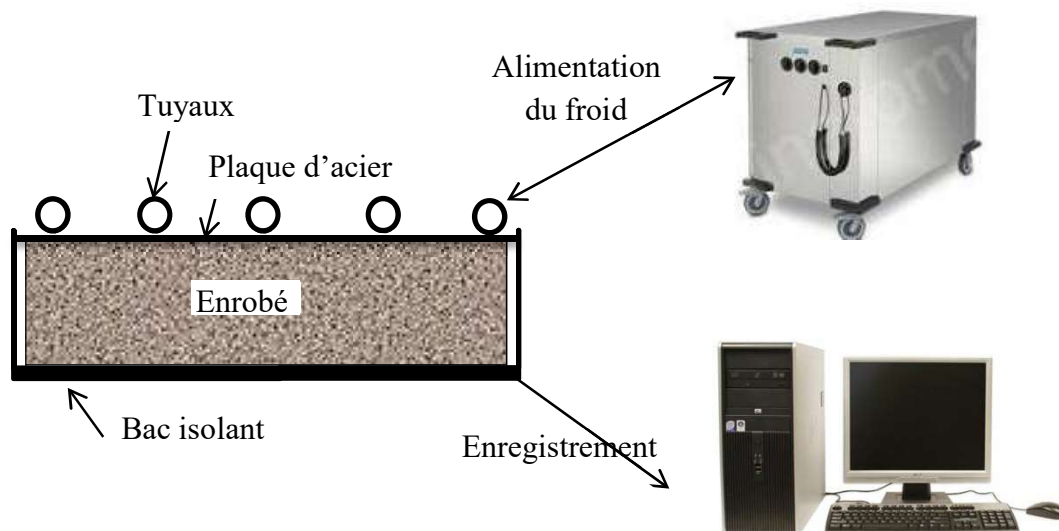


Figure 15. Dispositif expérimental pour la propagation de front de gel dans le bicouche; Le corps d'épreuve est placé dans un bac adiabatique muni en surface d'un serpentin assurant la circulation d'un réfrigérant et d'une plaque de diffusion thermique

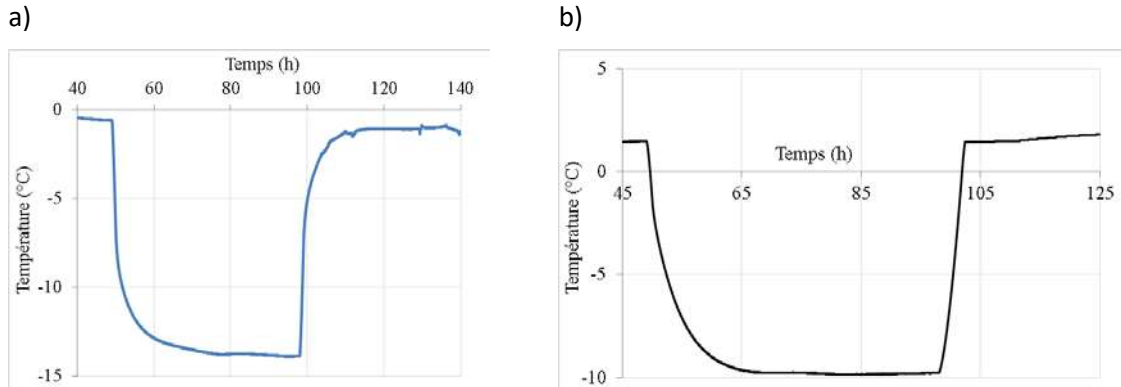


Figure 16. Cycles de température imposés au niveau de la plaque d'acier; a) Cycle n°1 ; b) Cycles n°2 et 3 décalés de +5°C par rapport au premier

Le corps d'épreuve est ensuite replacé dans le bac et soumis au trois cycles de gel/dégel de la Figure 16.

### Résultats

La Figure 17 présente les évolutions des déformations horizontales mesurées (après correction) à l'état sec par les jauges J2, J3, sur la première partie du cycle de température imposé. Les courbes sont proches l'une de l'autre et proportionnelles à la variation de température au voisinage de l'interface. L'amplitude de déformation d'environ  $320 \mu def$  pour une variation de température de  $\Delta\theta = 12,3^\circ C$  correspond à un coefficient de dilatation/contraction thermique  $\alpha = 26 \mu def/^\circ C$ , proche des valeurs usuelles d'un EB. Ceci montre :

- d'une part, un comportement solidaire des couches d'EB entre elles, qui subissent des déformations horizontales voisines de part et d'autre de leur interface ;
- d'autre part, un état de déformation horizontale de l'ensemble des deux plaques relativement peu gêné par le collage sur le marbre (le retrait thermique de celui-ci mesuré par la jauge J4 est de l'ordre de  $85 \mu def$  correspondant à  $\alpha_{marbre} = 7 \mu def/^\circ C$ ).
- Lors de la phase de réchauffement (non présentée ici) les deux couches restent collées entre elles.

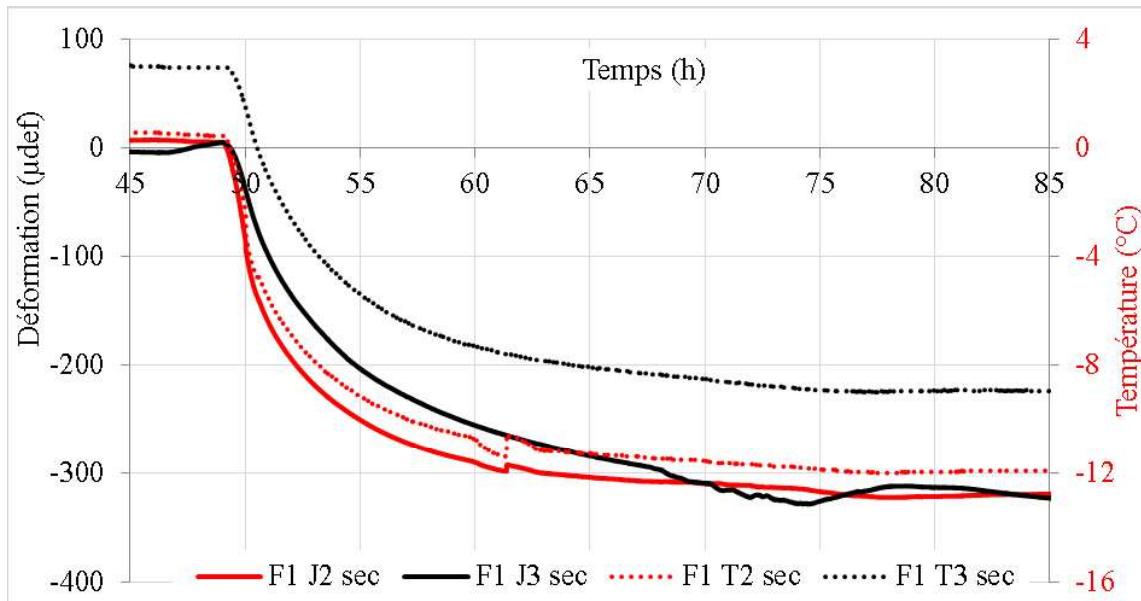


Figure 17. Températures T2, T3 et déformations corrigées de J2 et J3 sur bicouche sec

La Figure 18 montre quant à elle l'enchaînement des trois cycles sur le bicouche saturé, en partie supérieure. Les évolutions du premier cycle et des deux suivants sont clairement à distinguer, indépendamment de la différence entre leurs températures de consigne.

Le premier cycle montre une évolution quasi-identique des jauges J2 et J3, malgré la différence de saturation des deux couches et donc d'effet du gel sur leur comportement. Ceci atteste d'une bonne condition de collage de l'interface et confirme que celle-ci n'a pas été affectée par le cycle préalable effectué à sec.

En revanche, le second cycle met en évidence des comportements fortement différenciés des deux jauges, peu après le nouveau passage à température négative. La jauge J2 subit une variation de déformation en extension, typique des dilatations par effet de gel vues sur essais CTFS à déformation libre, alors que la jauge J3 continue à se contracter en réponse à la baisse de température. Une différence notable de valeurs de déformations continue ensuite à exister tout au long de ce second cycle. Le troisième cycle se comporte quasiment à l'identique du second, confirmant le changement de fonctionnement de l'interface survenu au cours du second cycle.

La variation de la réponse relative des jauges J2, J3 entre le premier et second cycle montre sans conteste une désolidarisation subite des couches provoquée par les sollicitations thermiques imposées. L'examen détaillé des courbes montrent que le phénomène commence à se manifester au cours de la phase de dégel du premier cycle. On peut supposer que l'interface rompt sous l'effet des autocontraintes et des efforts d'arrachement se produisant au cours de la première phase de gel, mais que le phénomène ne devient détectable que lorsque l'effet de « colle » apporté par la glace disparaît à température croissante.

En tout état de cause, on obtient ainsi en laboratoire une première preuve expérimentale de la possibilité d'un délaminage par effet de gel, d'une interface de couches de chaussée poreuses, partiellement saturées.

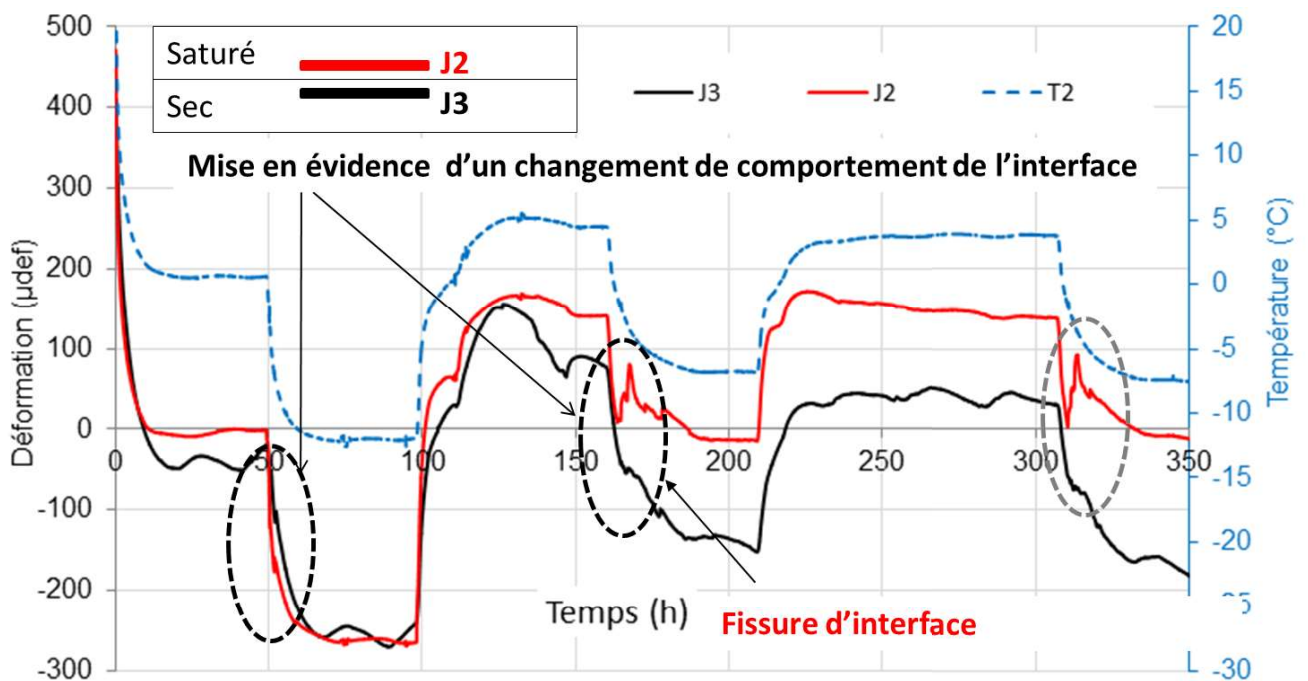


Figure 18. Essai sur bicouche partiellement saturé  
 Evolution de la température T2 (échelle de droite) et des déformations J2&J3 mesurées de part et d'autre de l'interface (échelle de gauche). La comparaison des évolutions entourées d'une ellipse met clairement en évidence un délaminage d'interface



### 3.6 Travaux de modélisations numériques

L'ensemble des travaux expérimentaux menés dans (Vu et al., 2020) a été accompagné de développements théoriques et numériques visant à simuler les essais CTFs, TSRST et de gel sur bicouche, décrits précédemment. Les modélisations effectuées ont permis de s'assurer de la bonne interprétation des essais et de la bonne compréhension des phénomènes mis en jeu.

Ces travaux ont porté sur deux aspects complémentaires:

1. la formulation d'une loi de comportement thermo-visco-élastique 3D pour EB partiellement saturé, avec prise en compte de l'effet de gel
2. la résolution générale du problème structurel thermo-mécanique semi-couplé, tenant compte :
  - d'une part de l'équation de la chaleur en présence d'un front de gel (conditions de « saut de Stefan »)
  - d'autre part de la loi de comportement mentionnée ci-dessus.

La loi de comportement (Tableau 1) est basée sur le modèle de fluage de Huet (1963) avec addition de deux termes de déformation isotrope, fonction de la température :

- l'un représente le terme usuel de dilatation/contraction des solides, proportionnel à la température
- l'autre terme est associé au gonflement libre mis en évidence sur les essais CTFs.

La dépendance de la loi de fluage à la température est considérée au travers de la fonction de translation en température et de la notion de temps équivalent.

Tableau 1. Loi de comportement isotrope pour EB partiellement saturé

$\boldsymbol{\varepsilon}(t, S_w) = \underbrace{\tilde{J}_H \boxtimes [(1 + \nu)\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t) - \nu \operatorname{tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)) \mathbf{I}]}_{\text{déformation de fluage liée aux contraintes}} + \underbrace{\alpha \Delta\theta(t) \mathbf{I}}_{\text{dilatation thermique}} + \underbrace{\varepsilon_f(\theta(t), S_w)}_{\text{gonflement lié au gel}} \mathbf{I}$
avec :
$\boldsymbol{\varepsilon}(t, S_w)$ = tenseur de déformation du matériau , fonction du temps et du degré de saturation
$\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)$ = dérivée par rapport au temps du tenseur des contraintes
$\nu$ = coefficient de Poisson
$\theta$ = température du matériau en °C
$\Delta\theta$ = variation de température par rapport à l'état de référence, considéré à déformation nulle
$\alpha$ = coefficient de dilatation thermique du matériau (valeur considérée constante)
$\tilde{J}_H(u) = \frac{1}{E_\infty} \left( 1 + \frac{u^h}{\Gamma(h+1)} + \delta \frac{u^k}{\Gamma(k+1)} \right)$ = loi de fluage de Huet adimensionnée en temps
$E_\infty$ = valeur maximale de rigidité du matériau
$h, k$ = exposants tels que: $0 < k < h < 1$ , $\Gamma$ = fonction Gamma
$\boxtimes$ = opérateur de « pseudo » convolution par rapport au temps équivalent, défini par :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\tilde{J}_H \boxtimes \dot{\sigma} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_H(\tilde{t}_e(t) - \tilde{t}_e(\tau)) \dot{\sigma}(\tau) d\tau</math> où :</li> <li>• <math>\tilde{t}_e(t) - \tilde{t}_e(\tau) = \int_{\tau}^t \frac{du}{a(\theta(u))}</math> = différence entre temps équivalents</li> <li>• <math>a(\theta)</math> = fonction de translation en température du matériau</li> </ul>
$\varepsilon_f(\theta, S_w) = \varepsilon_{f0}(S_w) \frac{1 - \tanh[m(\theta - \theta_f)]}{2}$ = déformation de gonflement, fonction de la température du matériau et de son degré de saturation
$\varepsilon_{f0}(S_w)$ = valeur de gonflement mesurée sur essai CTFS
$\theta_f$ = température de changement de phase liquide/solide
$m$ = paramètre de régularisation de la loi de changement de phase

Les équations thermique et mécanique du problème structural sont écrites sous forme variationnelle et résolues numériquement sur la base d'une discrétisation temporelle par différences finies et d'une discrétisation spatiale par éléments finis. Les algorithmes obtenus (cf. Annexe A) sont implémentés en 2D (contraintes planes, déformations planes et en axisymétrie pour la modélisation des essais sur éprouvettes cylindriques), sous forme de scripts au sein de l'environnement FreeFem++ (Hecht, 2012).

L'ensemble de ces développements sur la loi de comportement et la résolution des problèmes structurels est décrit en détail dans (Vu et al., 2018) et (Vu et al., 2020).

Les Figure 19 à Figure 22 suivantes présentent quelques résultats de simulation ainsi obtenus des différents essais mentionnés précédemment. On peut observer dans l'ensemble une bonne restitution numérique des observations et mesures expérimentales.

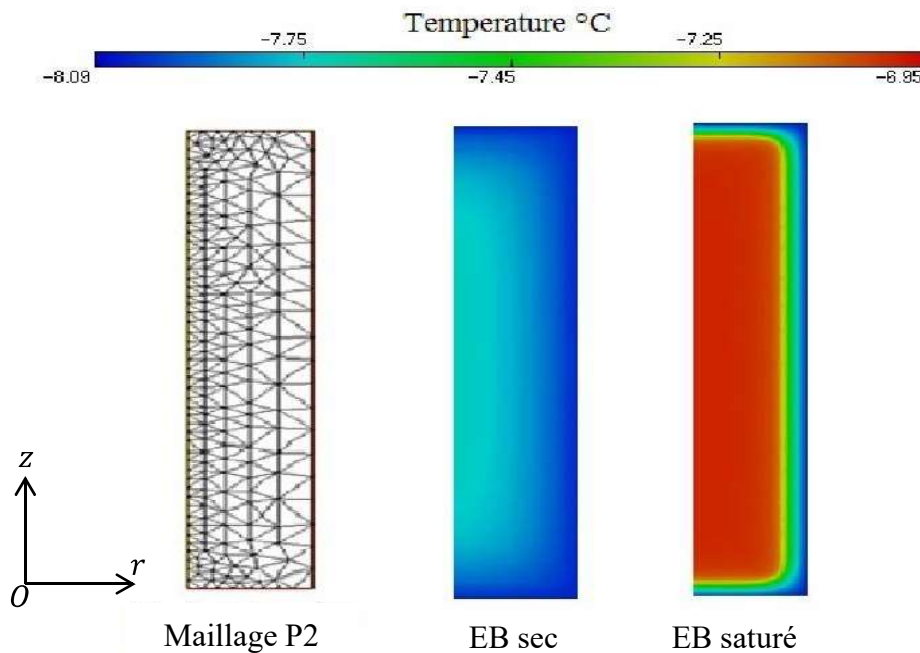


Figure 19. Simulation thermique de l'essai CTFS  
Maillage FreeFem++ et comparaison des cartes de température calculées à l'instant  $t = 50 \text{ min}$  dans le cas d'un EB sec et d'un EB partiellement saturé ( $\theta_{ext} = -8,1^\circ\text{C}$ ,  $\theta_f = -7^\circ\text{C}$ )  
Les calculs sur EB saturé mettent clairement en évidence la présence du front de gel lié à la chaleur latente de transformation d'eau liquide en glace

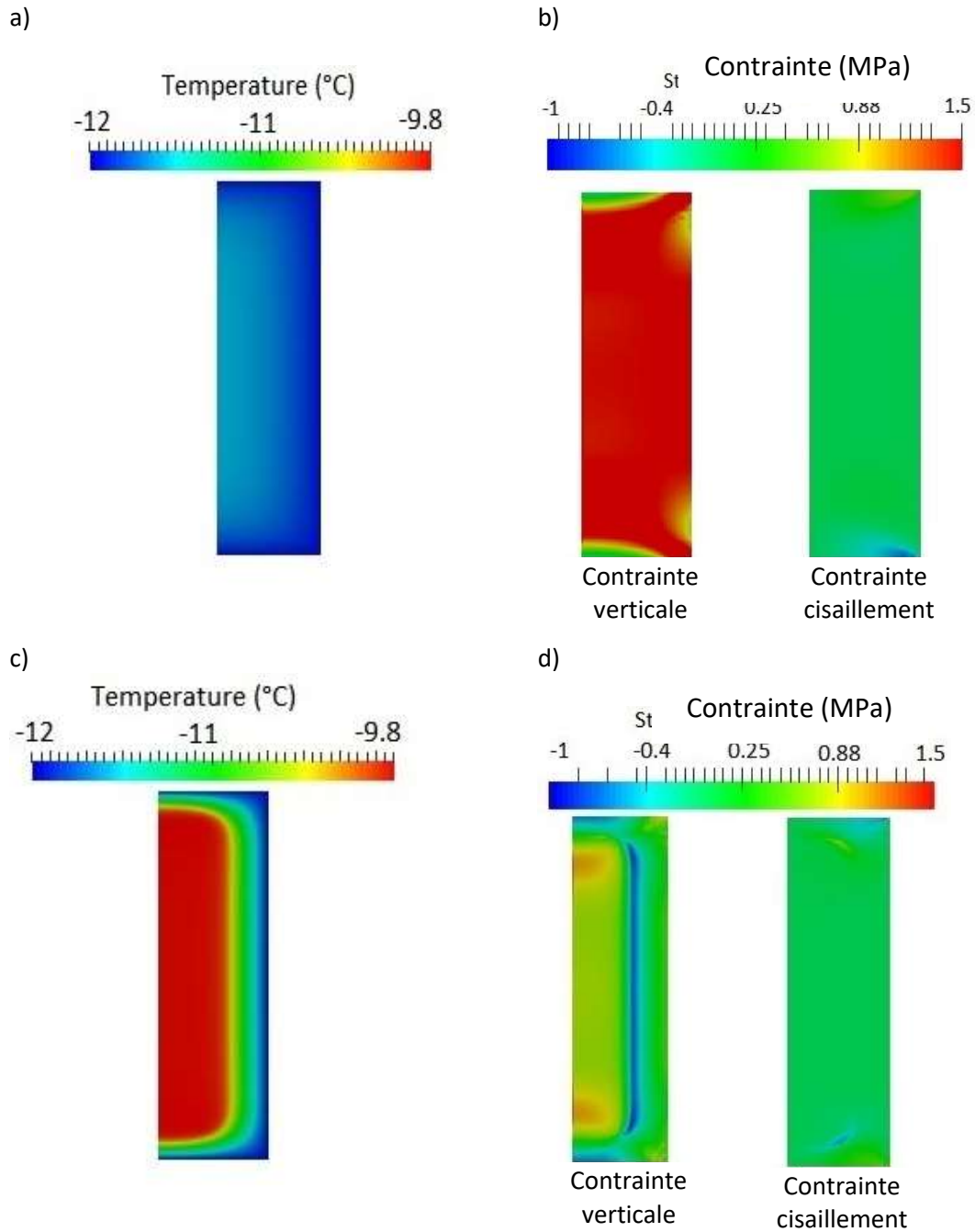


Figure 20. Simulation de l'essai TSRST. Comparaison entre EB sec (a et b) et EB partiellement saturé (c et d)  
Cartes de température et des contraintes axiale et de cisaillement obtenues à l'instant  $t = 3,12 \text{ h}$  pour  $\theta_{\text{périphérie éprouvette}} \approx -12^\circ\text{C}$ . La figure du bas montre en particulier la forte hétérogénéité de contrainte axiale induite dans l'échantillon par le front de gel

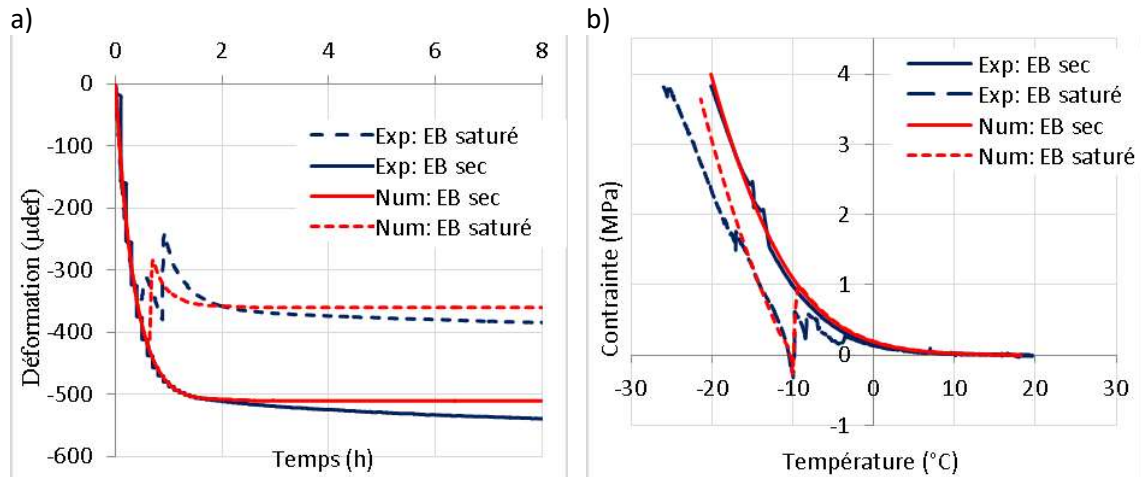


Figure 21. Comparaison entre les résultats expérimentaux (Exp) et numériques (Num) des essais; a) Évolutions des déformations CTFS ; b) Évolutions de contrainte axiale TSRST

Les simulations génèrent des évolutions plus lisses que les courbes expérimentales en phase de gel partiel, où l'eau est présente sous forme liquide et solide en fonction de la position du front de gel dans l'échantillon, mais les deux essais sont convenablement simulés dans leur ensemble

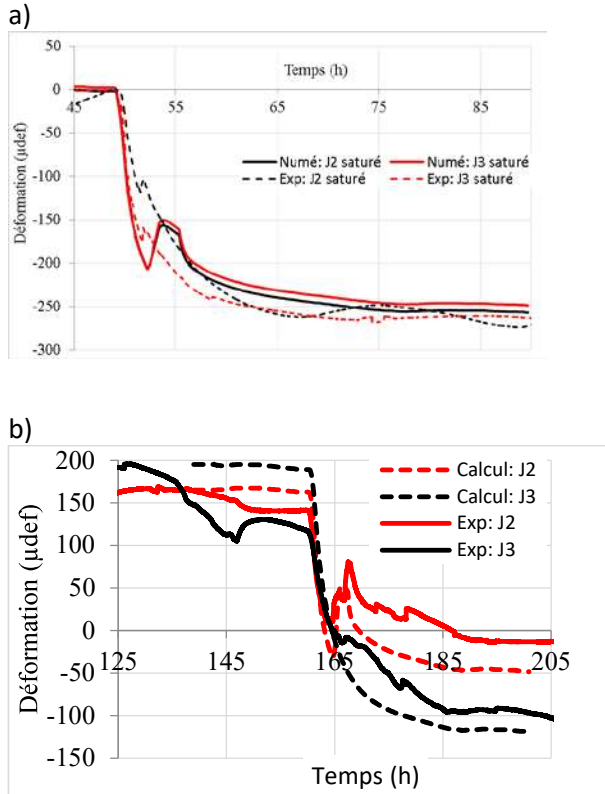


Figure 22. Simulation de l'essai de gel/dégel sur bicouche saturé en couche supérieure  
 Comparaison des évolutions expérimentales et numériques de l'évolutions des déformations des jauges J2&J3  
 a) Simulation du premier cycle en supposant l'interface parfaitement collée; b) Simulation du second cycle, en supposant l'interface fissurée  
 La bonne restitution numérique d'ensemble des courbes expérimentales conforte l'interprétation du délaminage de l'interface provoquée par le gel

## 4 Pré-essais en laboratoire sur les matériaux de la chaussée construite sur la fosse de l'Université Laval

Une plaque de 600X400 (mm) a été fabriquée à partir des matériaux ESG 10 foisonnés, prélevés lors de la réalisation de la couche de roulement de la fosse expérimentale de l'Université Laval. Ces matériaux ont été expédiés à l'IFSTTAR afin de mener en laboratoire, une série d'essais préliminaires aux essais à échelle réelle.

Dans un premier temps, une série d'échantillons a été confectionnée avec le Compacteur de plaques MLPC (NF EN 12697-33) de l'Université Gustave Eiffel, afin d'obtenir un pourcentage de vides proche de celui obtenu sur la fosse de l'Université Laval (n entre 7,9% et 9,1%). La valeur de la teneur en vides a été obtenue par mesure au banc Gamma. Les résultats de ces essais montrent un pourcentage de vide moyen de l'ordre de 8 % (Figure 23).

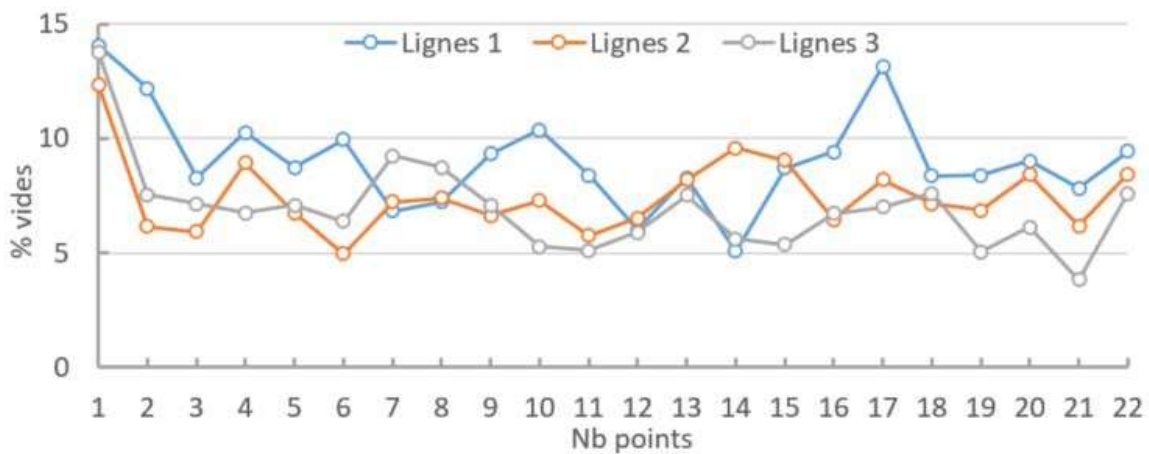


Figure 23. Pourcentages de vides obtenus sur la plaque d'enrobé bitumineux

Des prismes et cylindres ont été sciés ou carottés dans ces plaques d'enrobé, afin de réaliser les trois types d'essais de laboratoire suivants (Figure 24) :

- Prismes pour mesures de permittivité à la sonde CAPA ;
- Prismes pour essais de saturation à charge constante ;
- Cylindres pour essais de Gel/Dégel 3D en enceinte (essai CTFS).

La mesure de la permittivité du prisme 1 est réalisée à différents niveaux de saturation. L'objectif est de caractériser le taux de saturation d'un échantillon par une méthode non destructive. Cette méthode servira par la suite pour estimer le degré de saturation de l'enrobé de surface de la chaussée de la fosse d'essai.

De l'autre côté, l'essai de saturation gravitaire réalisé sur l'éprouvette 2 a pour objectif de nous renseigner sur la durée nécessaire pour atteindre le degré de saturation visé, fixé à environ 40% (Figure 25).

L'essai de gel/dégel 3D sur les éprouvettes cylindriques est réalisé dans le but de déterminer la cinétique de propagation du front de gel dans la couche de surface et la déformation de gonflement telle que définie dans l'essai CTFS. Cet essai est réalisé sous condition sèche, puis partiellement saturée.

D'autres types d'essais sont prévus, ils seront réalisés dans un second temps.

- Essai de gel 1D sur bicouche (condition adiabatique sur les flancs)
- Essai de module complexe sur les matériaux bitumineux GB et ESG

L'essai de gel 1D sur bicouche vise à caractériser le décollement des couches sous l'effet de la propagation du front de gel (cf. section 3.5).

L'essai de module complexe vise à caractériser la rigidité du mélange ESG10 à l'état sec, puis à l'état saturé (Essai de module complexe).

Les résultats de ces essais seront utilisés d'une part pour guider le protocole expérimental mis en œuvre sur l'essai à échelle réelle, d'autre part pour mener des modélisations en appui de l'interprétation des observations expérimentales faites au cours de cette expérimentation.

Les résultats de l'ensemble de ces essais seront consignés dans le prochain rapport.



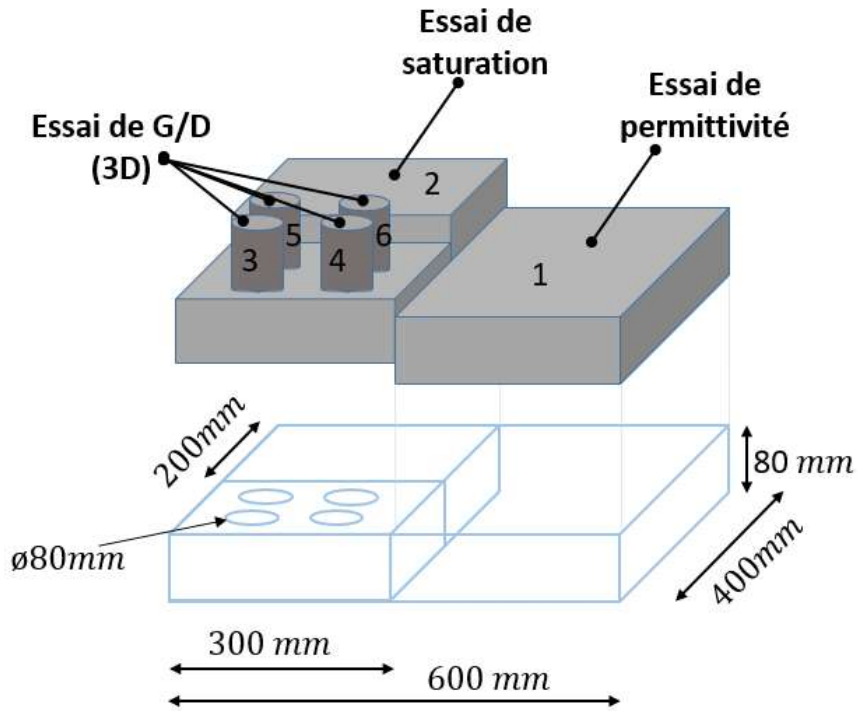


Figure 24. Essais de laboratoire menés à l'IFSTTAR sur les matériaux de la fosse expérimentale

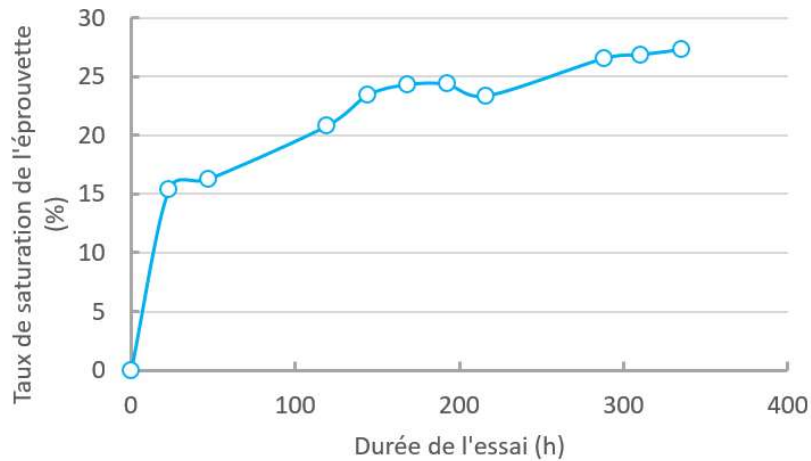


Figure 25. Essai de saturation gravitaire ; évolution du taux de saturation en fonction du temps (essai encore en cours à la date de rédaction de ce rapport)

## 5 Rappel sur les caractéristiques de la fosse expérimentale

La fosse expérimentale est située dans le garage de recherche du département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval (Figure 26). La configuration du garage est prévue de façon à ce que le simulateur climatique et de véhicules lourds soit positionné directement au-dessus de la fosse. Les systèmes de chaussées expérimentales sont construits dans la fosse, lorsque le simulateur est déplacé temporairement.

La fosse expérimentale possède les caractéristiques suivantes :

- Dimensions : 2 m x 6 m x 2 m (Largeur x Longueur x Profondeur), soit 24 m<sup>3</sup>. Les dimensions de la fosse sont adaptées aux caractéristiques techniques et aux dimensions du simulateur. Par exemple, la longueur de la fosse (6 m) a été établie à partir de la capacité maximale du simulateur en termes de longueur de planche d'essai.
- Rampe d'approche de 6 m de longueur pour faciliter l'accès de la machinerie (Figure 26);
- Drainage et injection d'eau au bas de la fosse. Cette caractéristique permet de notamment contrôler la hauteur d'eau dans le système de chaussée. Le point d'injection et de drainage est situé à une extrémité de la fosse. Afin de s'assurer de la distribution uniforme de l'eau dans la fosse, une couche de pierre nette 10-14 mm d'environ 200 à 250 mm est typiquement mise en place au fond de la fosse (Figure 27). Le niveau d'eau est contrôlé automatiquement par un capteur de pression électronique.
- Possibilité de collecte indépendante des eaux de percolation dans la chaussée. L'eau drainée peut être recueillie de façon indépendante dans un bassin de sédimentation situé en dessous du niveau inférieur de la fosse. Cette caractéristique présente un intérêt spécifique pour, par exemple, l'étude de la migration de contaminants aux travers des couches du système de chaussées ou de la composition chimique des lixiviats ayant migrés dans la structure.
- Circuit fermé de liquide de conditionnement thermique dans la dalle de béton du bas de la fosse pour le contrôle de la température et du gradient thermique. Le simulateur

permet de contrôler la température appliquée en surface du système de chaussée, alors que la fosse est équipée pour effectuer le contrôle de la température en base. Pour ce faire, deux compresseurs de contrôle thermique -1 à -10 °C de 7,46 kW sont utilisés. Un circuit fermé de tuyauterie préalablement encastré dans le béton lors de la coulée. Ces outils permettent d'assurer un contrôle de température en base de la fosse variant entre près de 30 °C (chauffage du système par frottement) à -10 °C.

- Zone d'accès à la façade latérale de la fosse pour faciliter l'instrumentation et le contrôle.
- Fosse divisible en deux sur la longueur pour augmenter la productivité et diminuer les coûts

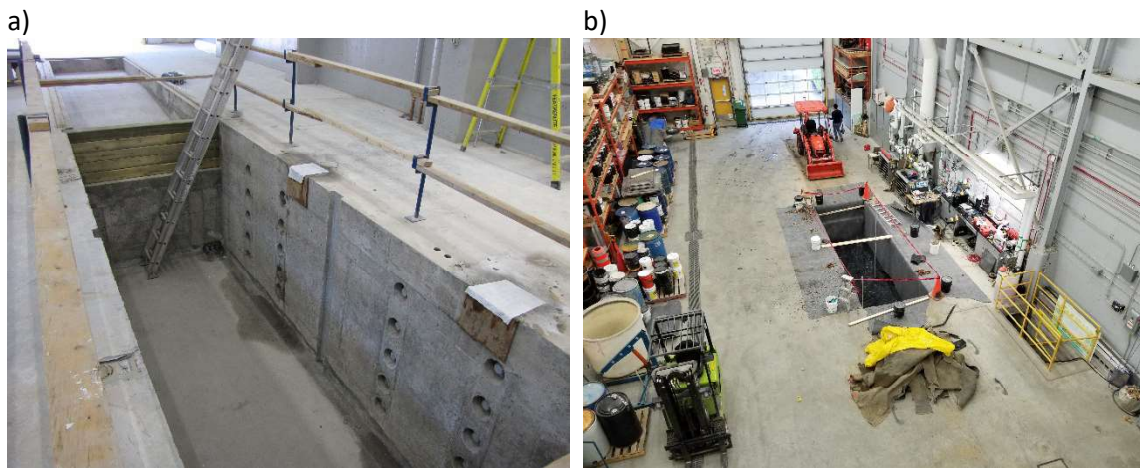


Figure 26. a) Fosse expérimentale et rampe d'accès; b) Vue de dessus de la fosse

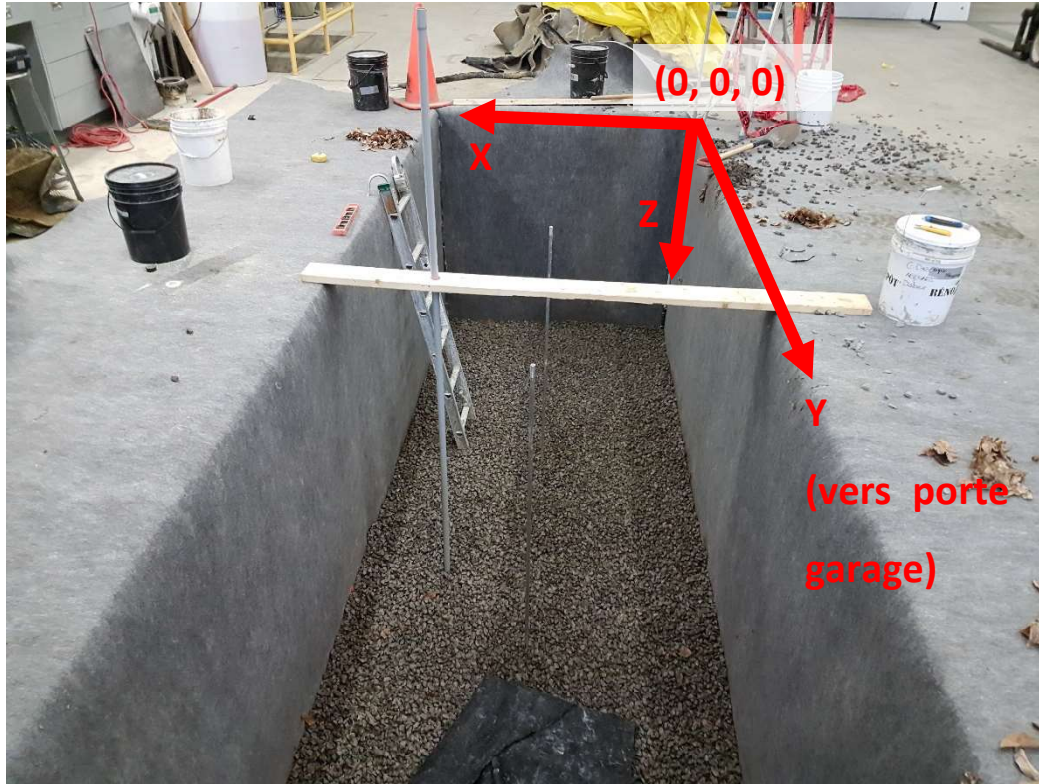


Figure 27. Utilisation de pierre nette au fond de la fosse



Figure 28. Unités de conditionnement thermique pour la dalle de béton au bas de la fosse

À la Figure 27, il doit également être noté qu'un système de coordonnées est utilisé pour référencer tous les instruments, couches et essais en X (transversal), Y (longitudinal, direction de roulement du chariot du simulateur) et Z (profondeur). Le point de référence en  $X=0$ ,  $Y=0$  et  $Z=0$  est montré sur la figure. La direction Y est orientée vers la porte du garage.

## 6 Excavation de l'ancienne chaussée

La chaussée expérimentale utilisée pour le projet de l'hiver 2019, pour le compte de la Chaire i3C, a été excavée en octobre 2019. La chaussée excavée était constituée de 100 mm de GB20, 250 mm de MG20 et 450 mm de MG112, pour une épaisseur de 800 mm. Le sol d'infrastructure, qui est conservé pour ce projet, est un sable silteux (SM). L'excavation a été effectuée jusqu'à une profondeur de 825 mm (Z=-825 mm) et remanié sur une profondeur additionnelle d'environ 150 mm, tel que montré à la Figure 29. Le sol. Ceci a été fait afin d'excaver le matériel contaminé par les activités d'excavation (mélange entre les diverses couches de matériaux) et de réinitialiser l'endommagement du sol d'infrastructure.



Figure 29. Excavation de l'ancienne chaussée jusqu'à une profondeur Z=-825 mm

## 7 Construction

Le remplissage de la fosse a été effectué avec un tracteur hydraulique (Figure 30). Les matériaux de chaussées ont préalablement été entrés à l'intérieur du garage afin de les protéger des intempéries climatiques. Les matériaux ont été placés et étendus dans la fosse à la pelle et au râteau (Figure 31) afin d'obtenir des couches le plus uniforme possible. Chaque couche de matériaux de chaussée a été mise en œuvre par sous-couche. La sous-fondation et la fondation ont été mis en œuvre en deux sous-couches. La recompaction de la partie supérieure du sol d'infrastructure a été effectuée en une seule couche.



Figure 30. Remplissage de la fosse avec le tracteur hydraulique



Figure 31. Mise à niveau des couches avec des pelles et un râteau

## 7.1 Compactage

La densification des couches de sol et de matériaux granulaires a été effectuée avec deux principaux outils, soit une plaque vibrante Bomag BPR 35/60 ayant un pouvoir de compaction de 40 kN et une marteau vibrant Hilti TE-1000 AVR équipé d'une plaque de 300 mm (Figure 32 et Figure 33). La plaque vibrante a été utilisée de façon générale sur la surface des matériaux dans la fosse. Pour sa part, le marteau vibrant a été utilisé pour certains endroits où la plaque vibrante n'avait pas accès, par exemple dans les coins de la fosse ou près de certains instruments.





Figure 32. Compactage à la plaque vibrante



Figure 33. Compactage au marteau vibrant utilisé près des instruments ou dans les secteurs non accessibles pour la plaque vibrante

Pour les couches d'enrobé, les matériaux ont été livrés avec un camion chauffant, ce qui a permis de conserver les matériaux dans des conditions optimales au niveau de la température. Le camion a déversé les matériaux par secteur au-dessus de la surface de la fosse et les matériaux bitumineux ont été étendus au râteau (Figure 34). Une couche de GB20 a été utilisée en couche de base, et un ESG10 en couche de surface. Chaque couche a été compactée en seule couche. Un rouleau vibrant lisse à deux cylindres de 40 po a été utilisé pour compacter les matériaux bitumineux (Figure 35), et une plaque vibrante a été utilisée pour faire du compactage près des extrémités de la fosse (Figure 36). Il doit être noté que le rouleau compacteur a été essentiellement utilisé sans vibration pour la mise en œuvre du GB20 et du ESG10.



Figure 34. Épandage de l'enrobé bitumineux à la surface – Exemple de la pose du ESG10 sur le GB20



Figure 35. Compactage des couches d'enrobé au rouleau



Figure 36. Compactage des extrémités de la fosse avec une plaque vibrante

## 7.2 Collage du bi-couche

Une couche de collage entre le GB20 et le ESG10 a été appliquée sur la surface de la couche de base. Le produit appliqué est une émulsion Supercol H de type CSS-1h, dont les caractéristiques peuvent être trouvées à l'annexe B. La surface de GB20 à couvrir était de 13,911625 m<sup>2</sup>. Cette surface comprend la zone d'environ 1,1 m supplémentaire en direction longitudinale.

Le produit a été mis en œuvre au rouleau. Afin d'assurer une bonne homogénéité du taux de pose, une quantité de 6,8 L a été séparée en quatre sous-parties volumiques égales (exemple à la Figure 37) et chacune a été étendue sur le ¼ de la longueur à couvrir longitudinalement. Cette quantité a été calculée à partir du taux de pose résiduel visé, soit 0,3 L/m<sup>2</sup>, et le pourcentage de bitume dans l'émulsion (61,9%).

Le taux de pose résiduel réellement obtenu est de 0,303 L/m<sup>2</sup> et le résultat final est montré à la Figure 38.

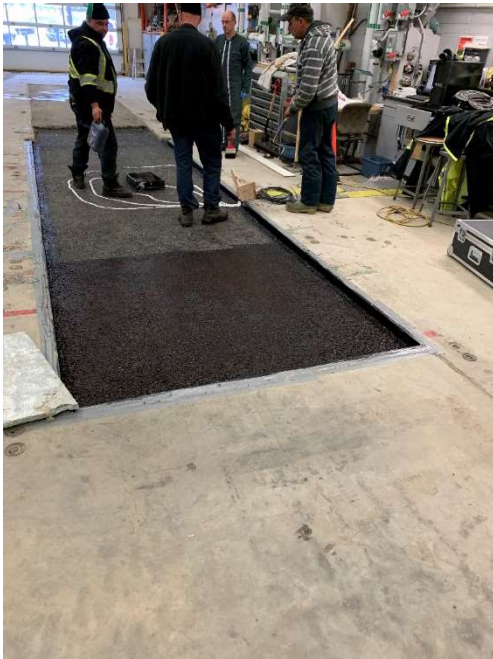


Figure 37. Mise en œuvre de la couche de liaison en sous-sections entre les deux couches d'enrobé



Figure 38. Émulsion bitumineuse mise en œuvre à la surface du GB20

### 7.3 Stratigraphie et épaisseur des couches

La profondeur finale du sommet de chacune des couches a été mesurée, en utilisant la surface du béton ( $Z=0$  mm) comme référence. Une grille de coordonnées fixe, tel qu'illustrée à la Figure 39, a été utilisée pour la mesure des profondeurs. La Figure 40 illustre les processus de mesure des profondeurs.

Sept points transversaux ont été considérés, soit en  $X=250, 500, 750, 1000, 1250, 1500$  et  $1750$  mm.

Onze lignes transversales ont été considérées, soit en  $Y= 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000,$  et  $5500$  mm. Pour les couches d'enrobés, des mesures ont été ajoutées en  $Y=6000, 6500$  et  $7000$  mm, parce que la zone supplémentaire longitudinale, en dehors de la zone principale de la fosse, permettait de le faire.

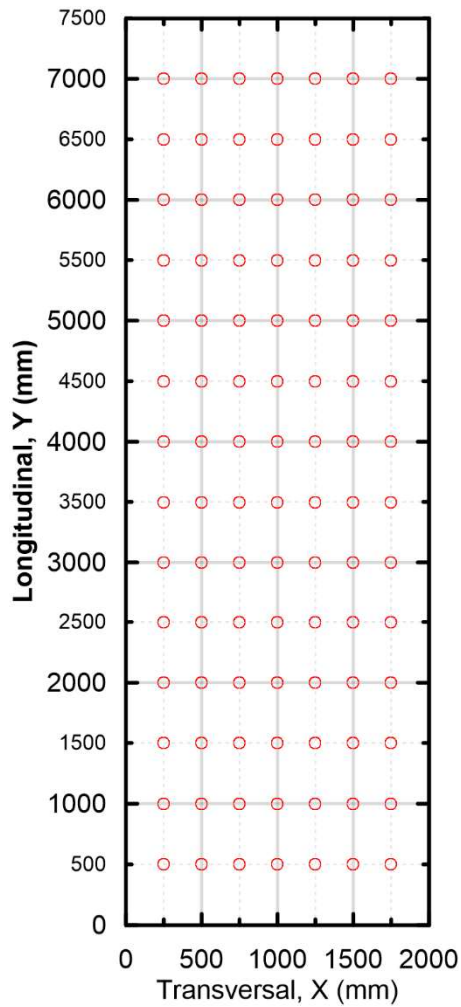


Figure 39. Grille de coordonnées utilisée pour la mesure des profondeurs

Les coordonnées de mesures considérées sont, pour le sol d'infrastructure et la sous-fondation (49 points) :

- X = 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 mm

- Y = 500, 1500, 2500, 3000, 3500, 4500, 5500 mm

Les coordonnées de mesures considérées sont, pour la fondation (77 points) :

- X = 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 mm

- Y = 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 mm

Les coordonnées de mesures considérées sont, pour le GB20 et le ESG10 (98 points) :

- X = 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 mm

- Y = 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000 mm



Figure 40. Mesure des profondeurs par rapport à Z=0 mm

Les mesures finales ont été prises suite à la densification et au profilage finaux. Le Tableau 2 présente le sommaire statistique des mesures de profondeur et la conversion en épaisseur des couches. Les moyennes et écarts-types ont été mesurés pour un nombre de points de mesures  $N$ . Près de la surface (fondation et revêtement), le nombre de point a été augmenté et les profils finaux ont été travaillés plus minutieusement afin d'avoir un contrôle plus précis des épaisseurs sur les couches ayant une importance structurale plus grande. Ceci est notamment observable au niveau des écarts-types, plus faibles près de la surface. La stratigraphie moyenne finale obtenue est 68 mm ESG10, 77 mm GB20, 234 mm MG20, 474 mm MG112. En moyenne, la surface de la couche de roulement est en dépression de 6,5 mm par rapport au niveau de la dalle de béton, ce qui est en accord avec les observations visuelles de la surface finale. Les données du Tableau 2 présentent également les épaisseurs moyennes calculées sur la partie centrale de la surface d'essai, c'est-à-dire pour  $Y$  allant de 1000 à 5000 mm et  $X$  allant de 500 à 1500 mm. Ces valeurs peuvent être davantage pertinentes pour les calculs structuraux, étant donné qu'elles sont davantage centrées sur la zone d'essai et qu'elles excluent notamment les effets de bords, où les épaisseurs peuvent avoir été biaisées par des difficultés de mise en place.

Tableau 2. Mesures de profondeurs et d'épaisseurs des couches lors de la construction

	N	Profondeur		Épaisseur		Épaisseur (centre)**	
		Moy. (Z) (mm)	É-T (mm)	Moy. (mm)	É-T (mm)	Moy. (mm)	É-T (mm)
ESG10	98	-6,5	4,9	68	4,9	70	3,7
GB20	98	-74,3	4,0	77	4,0	77	3,4
Fondation	77	-151,6	3,8	234	4,0	235	3,5
Sous-Fondation	49	-385,7	6,9	474	6,9	475	7,2
Sol d'infra.	49	-859,4	12,0	841	12,0	844	8,3
Pierre 14-10*		-1700		300		300	
Total				1994		2001	

\*Profil non mesuré, épaisseur approximative

\*\*Épaisseur calculée pour  $500 \leq X \leq 1500$  mm et  $1000 \leq Y \leq 5000$  mm

Afin d'apprécier de façon plus générale la mise en œuvre des couches sur toute la surface de la fosse, les mesures de profondeur ont été utilisées afin de faire une interpolation spatiale par krigeage, tel que présenté aux figures Figure 41 à Figure 45. Cette technique permet d'apprécier la distribution des profondeurs de chaque couche, et notamment d'identifier les points hauts et les points bas dans chaque profil, ainsi que les tendances spatiales.



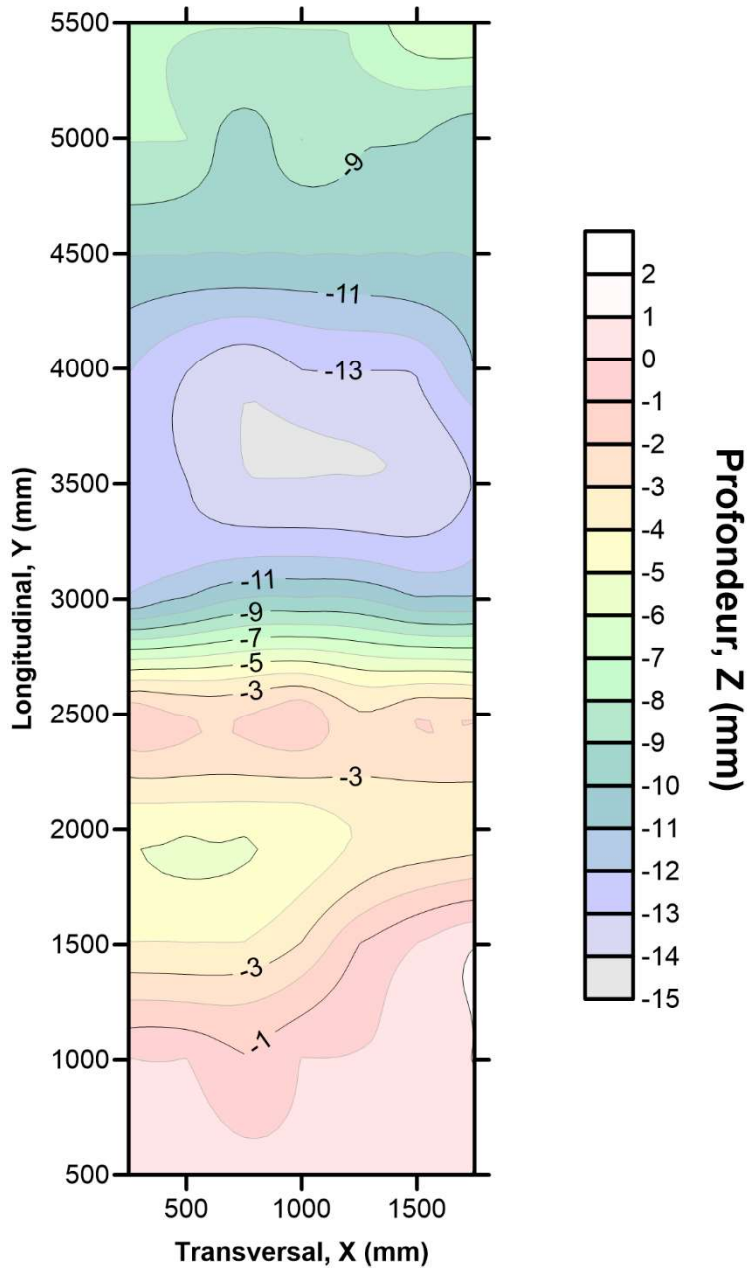


Figure 41. Profil du ESG10 obtenu de l'interpolation par krigeage

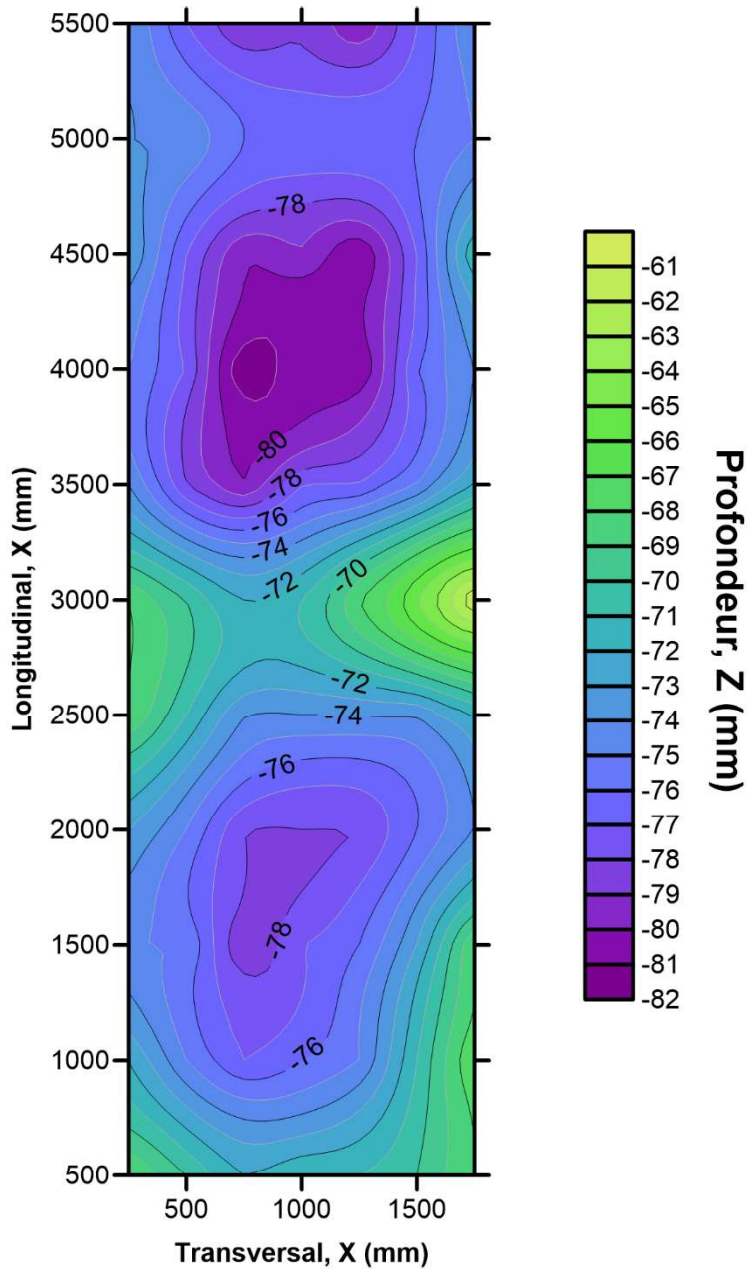


Figure 42. Profil du GB20 obtenu de l'interpolation par krigeage

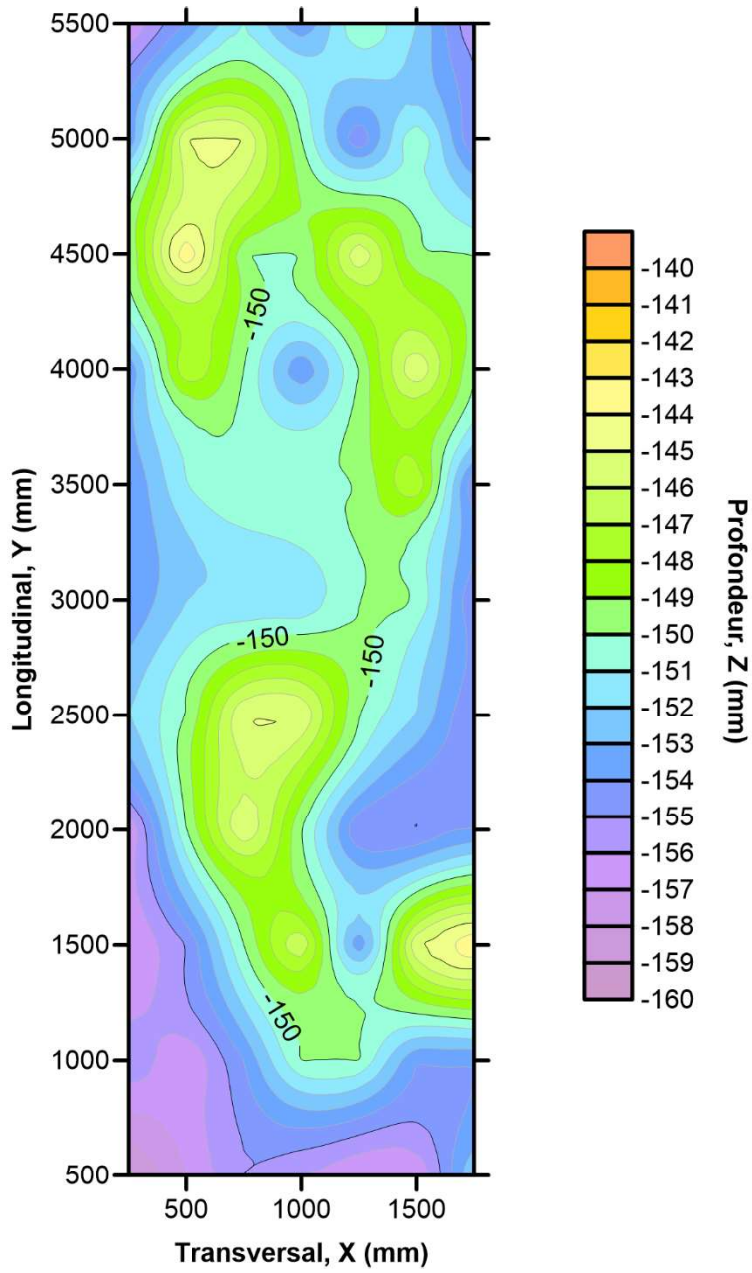


Figure 43. Profil du MG20 obtenu de l'interpolation par krigeage

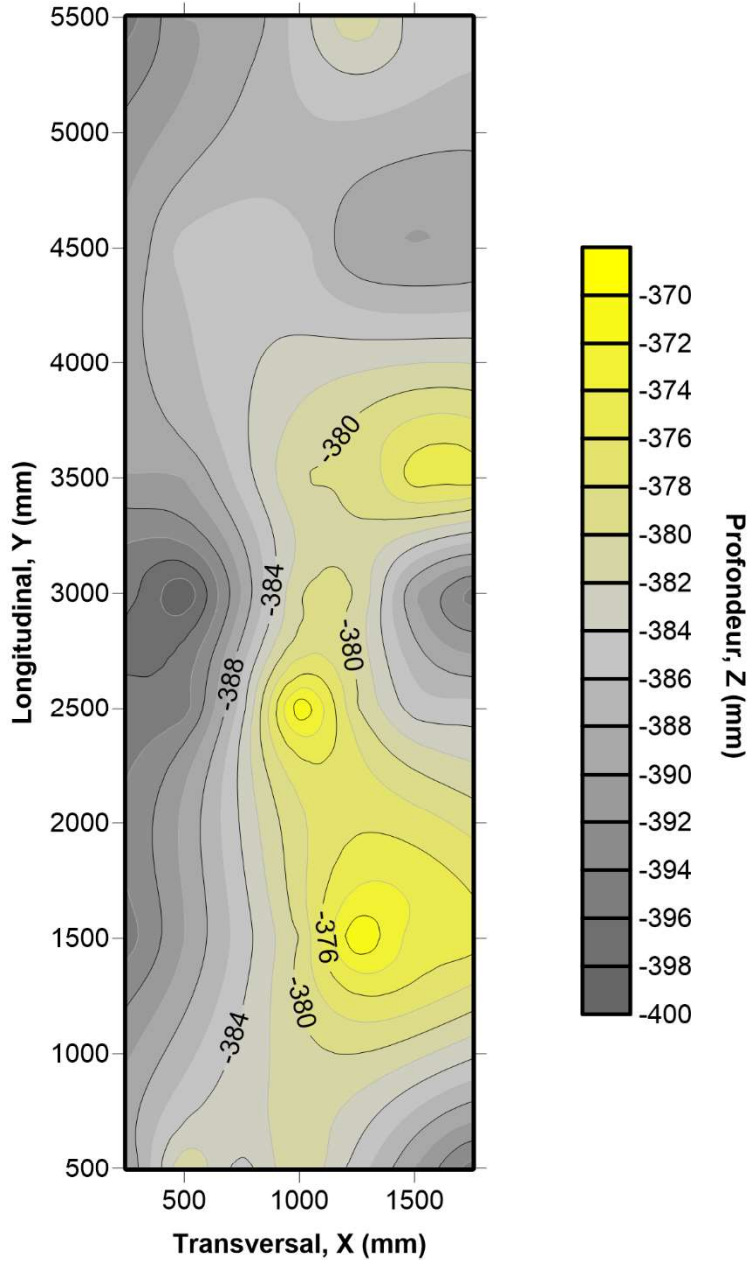


Figure 44. Profil du MG112 obtenu de l'interpolation par krigeage

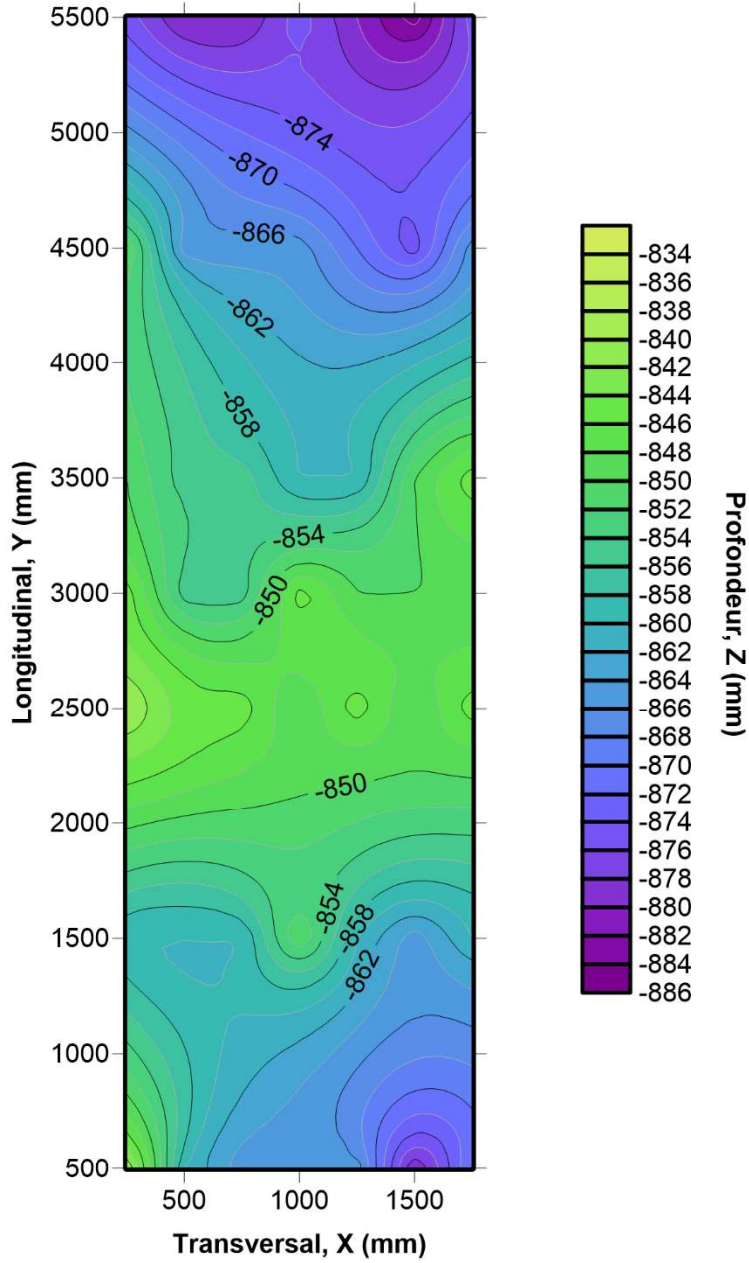


Figure 45. Profil du sol d'infrastructure obtenu de l'interpolation par krigeage

## 8 Caractérisation des matériaux

### 8.1 Propriétés des matériaux et essais de caractérisation

Dans le cadre de ce projet, deux couches d'enrobé bitumineux ont été mises en œuvre. Le mélange du GB20 est fabriqué avec quatre constituants granulaires, dont du granulat bitumineux recyclés (20%). La formule du ESG10 est un mélange de trois classes granulaires. Cette formule ne contient pas de matériaux recyclés. Dans les deux cas, le bitume utilisé est du 58H-34. Le Tableau 3 présente les formules utilisées pour chaque mélange. Les données complètes de formulation des enrobés et les caractéristiques du bitume se trouvent à l'annexe C.

Tableau 3. Granulométries des formules d'enrobé bitumineux utilisés

	Tamis (mm)										
	28	20	14	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.160	0.08
GB20 (%)	100	98	78	57	39	26	19	14	9	7	5,8
ESG10 (%)	100	100	100	97	60	41	29	22	16	9	7,5

Des essais de caractérisation de base ont aussi été effectués sur le sol et les matériaux granulaires. Les courbes granulométriques ainsi que certains indices associés à la distribution de la taille des grains, soient le pourcentage passant le tamis 5 mm (%P<sub>5mm</sub>) et le pourcentage de particules passant le tamis de 0,08 mm (%Fines), sont rassemblés à la Figure 46 et au Tableau 4. Le Tableau 4 regroupe également les résultats des essais proctor modifiés, qui ont permis d'obtenir la masse volumique sèche maximale  $\rho_{dmax}$  et la teneur en eau optimale  $w_{opt}$ , ainsi que les valeurs des limites d'Atterberg pour le sol d'infrastructure. L'annexe D regroupe les résultats des essais de caractérisation disponibles.

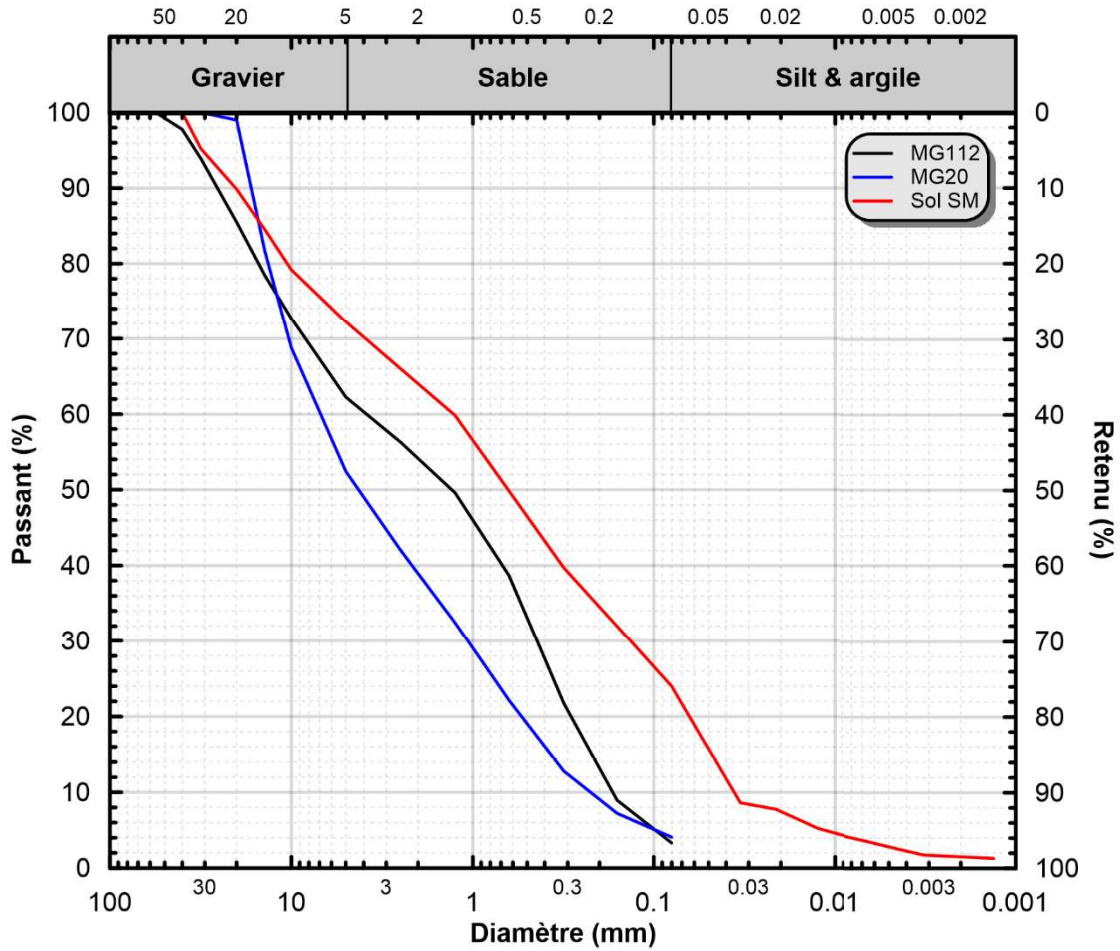


Figure 46. Distribution de la taille des grains pour les matériaux granulaires et le sol d'infrastructure

Tableau 4. Caractérisation du sol et des matériaux granulaires

	MG20	MG112	SM
$\rho_{dmax}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2245	2057	2170
w <sub>opt</sub> (%)	6,9	8,8	6,9
%P <sub>5mm</sub>	52	62	72
%Fines	4,1	3,3	24
w <sub>L</sub> (%)	-	-	15,6
w <sub>P</sub>	-	-	np

## 8.2 Défectomètre portable

Des essais au défectomètre portable (LWD) ont été effectués suite à la compaction finale des couches de sols et de matériaux granulaires. Cet outil, tel que montré à la Figure 47, permet de déterminer le module élastique de surface ( $E_{LWD}$ ) des couches en appliquant la théorie de Boussinesq. Pour réaliser l'essai, une masse est laissée tomber sur une plaque de chargement, créant une courte impulsion de contrainte d'environ 20 ms. Un géophone situé sous la plaque de chargement permet d'obtenir la déflexion dans le massif de sol engendrée par la contrainte en surface. L'Équation 1 utilisée est

$$E_{LWD} = \frac{2(1 - \mu^2)\sigma_0 a}{d_0} \quad \text{Équation 1}$$

dans laquelle  $a$  est le rayon de la plaque de chargement (150 mm),  $\sigma_0$  est la contrainte de surface,  $\mu$  est le coefficient de poisson (0,35) et  $d_0$  est la déflexion mesurée sous la plaque. Il doit être rappelé que les principales hypothèses de la théorie de Boussinesq sont considérées comme valides pour cette analyse (milieu continu, homogène, isotrope, élasticité linéaire).

Trois essais par couches de sols ou de matériaux granulaires ont été réalisés, la position des points de mesure est présentée à la Figure 48. Le positionnement des essais était restreint, dans une certaine mesure, par la présence des capteurs dans les couches. Chaque essai a consisté en trois chutes initiales de la masse sur la plaque, pour la hauteur de chute identifiée, suivie de trois autres chutes dont les mesures ont été conservées. Les contraintes de surface ont été sélectionnées afin de prendre en compte les limites de l'appareil (hauteur maximale de chute, hauteur minimale pour obtenir un signal adéquat) et les caractéristiques du système de la chaussée en considérant un cas de chargement type. Ainsi, des contraintes visées de 60, 80 et 100 kPa, ont été choisies pour le sommet du sol d'infrastructure, de la sous-fondation et de la fondation, respectivement.





Figure 47. Essai au LWD sur les couches mises en œuvre – Exemple de la sous-fondation

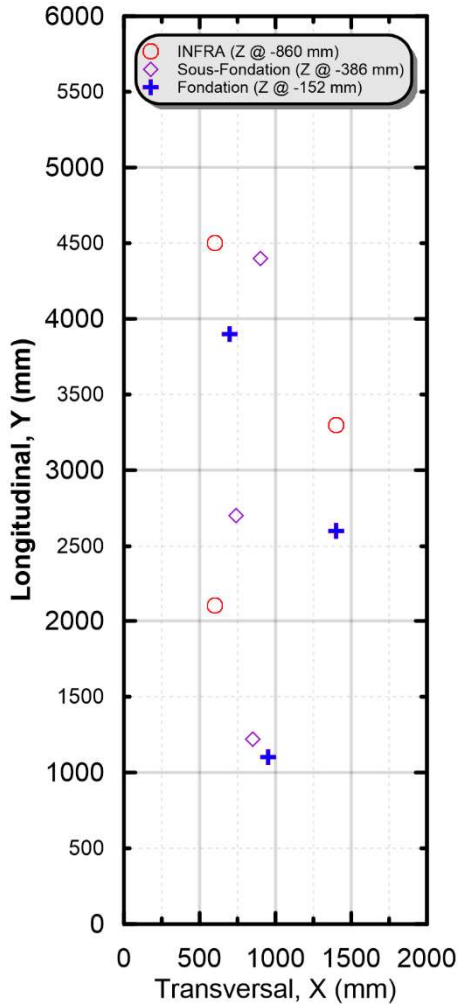


Figure 48. Position des points de mesure pris avec le déflectomètre portable

Le Tableau 5 présente les résultats obtenus au déflectomètre portable. Des modules élastiques de surface ( $E_{LWD}$ ) de 126, 113 et 110 MPa ont été obtenus pour la fondation, sous-fondation et le sol d'infrastructure, respectivement. Il doit être noté que le fait que certaines couches soient relativement minces (ex : fondation) implique que la mesure du module peut être influencée par la rigidité des couches inférieures.

Tableau 5. Résultats des essais au deflectomètre portable

Matériau	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	d <sub>0</sub> (µm)	σ <sub>0</sub> (kPa)	E <sub>LWD</sub> (MPa)	E <sub>LWD</sub> (moy.) (MPa)	E <sub>LWD</sub> (É-T) (MPa)
INFRA	1400	3300	-860	157	65.2	109		
INFRA	600	4500	-860	154	65.4	112	110.7	1.2
INFRA	600	2100	-860	156	65.7	111		
MG112	850	1220	-386	227	84.7	98		
MG112	740	2700	-386	173	84.5	129	113.0	15.4
MG112	900	4400	-386	197	83.6	112		
MG20	1400	2600	-152	216	100.2	122		
MG20	950	1100	-152	185	97.9	139	126.4	11.4
MG20	700	3900	-152	220	98.5	118		

### 8.3 Compacité couches non liées

Des mesures de compacité au nucléodensimètre (TROXLER) ont été prises suite au profilage et à la compaction finale des couches de sols et de matériaux granulaires. Pour chaque couche, quatre points de mesure ont été considérés. La position de chaque point de mesure, illustrée à la Figure 49, prend en compte les spécificités du système et la présence des instruments enfouis dans les couches. Les points de mesure ont été concentrés le plus possible dans la zone transversale centrale, ainsi que sur le 4 m central dans la direction longitudinale.

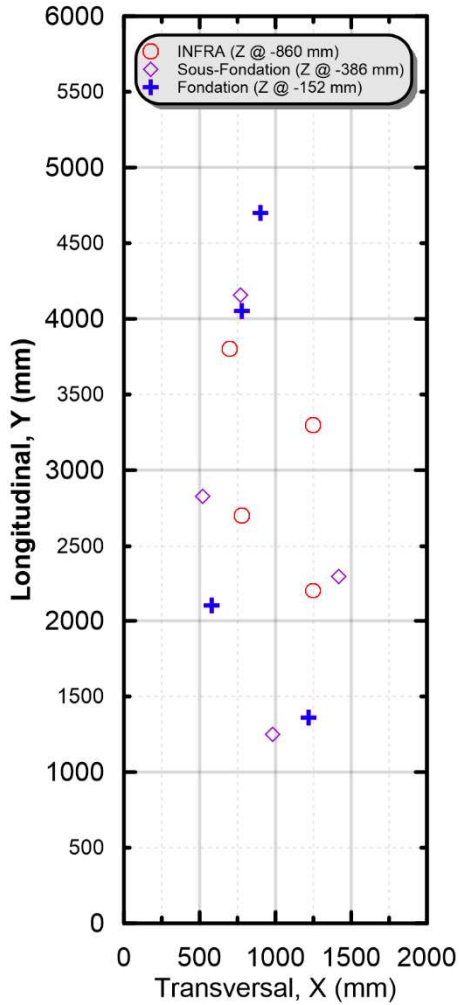


Figure 49. Position des points de mesures au nucléodensimètre pour les couches de matériaux granulaires et le sol d'infrastructure

Le Tableau 6 présente le sommaire des résultats collectés. En prenant en compte les résultats de la caractérisation, des degrés de compacité de 97, 99 et 96 % ont été obtenus pour les couches de sol d'infrastructure, sous-fondation et fondation, respectivement, en référence à la valeur de masse volumique sèche maximale (proctor modifié, Tableau 4). Le Tableau 6 regroupe les informations sur la position des points de mesures en X, Y et Z, la masse volumique humique  $\rho_h$ , la masse volumique sèche  $\rho_s$ , ainsi que la teneur en eau  $w$ .

L'annexe E regroupe les rapports d'essais réalisés au nucléodensimètre pour les sols et les matériaux granulaires.

Tableau 6. Résultats des mesures de masse volumique au nucléodensimètre prises sur les couches de matériau granulaires et de sols

Matériau	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	$\rho_h$ kg m <sup>-3</sup>	$\rho_d$ kg m <sup>-3</sup>	W (%)
INFRA	700	3800	-860	2226	2096	6.2
INFRA	1250	3300	-860	2181	2069	5.4
INFRA	780	2700	-860	2168	2065	5
INFRA	1250	2200	-860	2226	2111	5.4
				Moy.	<b>2085</b>	<b>5.5</b>
				É-T	<b>22</b>	<b>0.5</b>
MG112	770	4160	-386	2069	2022	2.3
MG112	520	2830	-386	2163	2109	2.6
MG112	1420	2300	-386	2087	2037	2.5
MG112	980	1250	-386	2045	1996	2.4
				Moyenne	<b>2041</b>	<b>2.5</b>
				ET	<b>48</b>	<b>0.1</b>
MG20	900	4700	-152	2197	2121	3.6
MG20	780	4050	-152	2212	2140	3.4
MG20	580	2100	-152	2239	2182	2.6
MG20	1220	1360	-152	2218	2151	3.1
				Moyenne	<b>2149</b>	<b>3.2</b>
				ET	<b>26</b>	<b>0.4</b>

#### 8.4 Compacité des enrobés

Des essais au nucléodensimètre ont été effectués en surface du GB20 et en surface du ESG10. Cinq et dix points de mesures ont été utilisés pour la surface du GB20 et du ESG10, respectivement. Il doit être noté que les cinq positions sur le GB20 ont été réutilisées pour les mesures sur le ESG10. Il doit aussi être précisé que 12 points de mesures complémentaires ont été relevés en surface du ESG10, cependant avec un nucléodensimètre différent, ce qui a conduit à un biais entre la première série de mesure et la deuxième.

La Figure 49 présente les différents emplacements de mesures utilisés pour les mesures au nucléodensimètre. Il est possible d'y observer la concordance entre les points de mesures pour le GB20 et certains points du ESG10. Les deux séries de mesures sur le ESG10 sont identifiées comme

ESG10#1 et ESG10#2. L'annexe F montre les emplacements des mesures tel que documentés par l'équipe technique du Ministère. Deux points sont à noter : 1. L'emplacement #10 (faisant partie de la série de mesures ESG10#1) n'a pas de coordonnées en X et Y; 2. Le système de coordonnées (en X) est différent de celui utilisé dans ce rapport, les coordonnées ont été ajustées pour la suite de l'analyse.

Il doit aussi être précisé que les emplacements 1, 2, 4 et 5 ont fait l'objet de carottage afin de déterminer la masse volumique des couches en laboratoire. Cette détermination a notamment permis d'établir un facteur de correction à appliquer aux valeurs de nucléodensimètre obtenues par mesure indirecte.

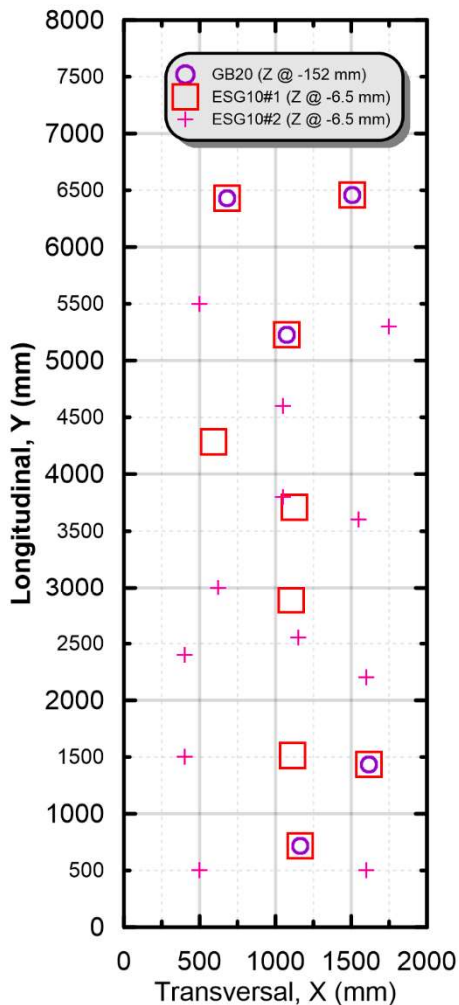


Figure 50. Position des mesures au nucléodensimètre sur les couches d'enrobés

Les mesures ont été recueillies par transmission indirecte (GB20 et ESG10). Cependant, un point de mesure a aussi été pris en transmission directe (ESG10 seulement) pour déterminer un facteur de correction préliminaire. Le résultat cette calibration est qu'une réduction de  $10 \text{ kg m}^{-3}$  doit être appliquée à la valeur obtenue par la méthode indirecte. Les résultats bruts mesurés au nucléodensimètre par la méthode indirecte sans correction sont regroupés au Tableau 7 pour les deux couches d'enrobés bitumineux. Pour chaque emplacement, cinq mesures ont été prises (M1 à M5) afin d'obtenir une moyenne.

Tableau 7. Mesures brutes au nucléodensimètre sur les couches d'enrobés

		X (mm)	Y (mm)	M1 (kg m <sup>-3</sup> )	M2 (kg m <sup>-3</sup> )	M3 (kg m <sup>-3</sup> )	M4 (kg m <sup>-3</sup> )	M5 (kg m <sup>-3</sup> )	Moy. (kg m <sup>-3</sup> )
GB20	1	1162	715	2291	2283	2259	2321	2285	2288
	2	1615	1431	2397	2361	2407	2424	2378	2393
	3	1074	5226	2498	2468	2536	2470	2426	2480
	4	1507	6460	2452	2318	2387	2393	2422	2394
	5	681	6429	2433	2454	2425	2458	2497	2453
								Moy. É-T	2402 75
ESG10#1	1	1162	715	2404	2371	2408	2386	2377	2389
	2	1615	1431	2401	2397	2396	2418	2389	2400
	3	1074	5226	2360	2371	2382	2363	2368	2369
	4	1507	6460	2360	2375	2370	2413	2385	2381
	5	681	6429	2269	2299	2307	2312	2316	2301
	6	1113	1514	2434	2455	2452	2430	2421	2438
	7	1104	2883	2329	2327	2321	2320	2317	2323
	8	591	4283	2305	2288	2296	2287	2295	2294
	9	1123	3712	2261	2254	2256	2260	2267	2260
	10	NA	NA	2331	2333	2332	2344	2347	2337
								Moy. É-T	2349 56
ESG10#2	1	1600	500	2333	2329	2308	2320	2383	2335
	2	500	500	2245	2203	2271	2207	2354	2256
	3	400	1500	2227	2223	2244	2231	2236	2232
	4	1150	2550	2428	2410	2399	2440	2397	2415
	5	400	2400	2322	2327	2327	2324	2326	2325
	6	1600	2200	2303	2259	2274	2298	2316	2290
	7	1050	3800	2205	2182	2210	2180	2182	2192
	8	620	3000	2108	2131	2140	2133	2134	2129
	9	1550	3600	2248	2265	2254	2257	2272	2259
	10	1750	5300	2279	2323	2294	2271	2250	2283
	11	1050	4600	2257	2267	2265	2268	2287	2269
	12	500	5500	2261	2245	2254	2243	2251	2251
								Moy. É-T	2270 72

Pour des méthodes de mesures identiques sans correction, les valeurs mesurées avec le nucléodensimètre utilisé pour les douze mesures ESG10#2 ont un biais qui semble généralisé lorsque les valeurs moyennes sont consultées par rapport aux valeurs de la campagne ESG10#1. Il doit d'ailleurs être rappelé que ces dernières peuvent, par ailleurs, être corrigées en utilisant la



mesure de la masse volumique des essais de laboratoire pour les carottes recueillies aux points 1, 2, 4 et 5 (ESG10#1). Ainsi, en utilisant les valeurs de la campagne ESG10#1 comme référence, les valeurs mesurées lors de la campagne ESG10#2 peuvent être d'abord corrigées en utilisant les points #9 (ESG10#1) et #7 (ESG10#2). En effet, selon le Tableau 7 et la Figure 49, ces deux points de mesure sont très près l'un de l'autre. Il peut être assumé en première approximation que les mesures devraient être très similaires. L'écart entre le point #7 (ESG10#2) et le point #9 (ESG10#1) est de -73 mm en X, et de 88 mm en Y, et l'écart en diagonale est de 115 mm. En prenant comme hypothèse que la mesure devrait être identique, il est constaté que le point #7 (ESG10#2) est moins dense que le point #9 (ESG10#1) de  $-68 \text{ kg m}^{-3}$ . Cette valeur, utilisée comme biais entre les deux appareils, sera utilisée comme facteur de correction entre les nucléodensimètres utilisés pour corriger à la hausse les données collectées lors de la campagne de mesure ESG10#2.

Ainsi, en termes de correction de masse volumique, les données collectées pour la campagne ESG10#1 doivent être corrigées en fonction du résultat de l'analyse des 4 carottes (CR-1, CR-2, CR-3 et CR-4) en laboratoire, qui se trouvent à l'annexe G. Le même exercice doit être effectué pour le GB20. La correction suggérée pour les mesures au nucléodensimètre sur la base des résultats de laboratoire, tel que montrée au Tableau 8, est de +27,6 et +82,8  $\text{kg m}^{-3}$  pour le ESG10 et le GB20, respectivement.

Tableau 8. Facteurs de correction de la masse volumique au nucléodensimètre par comparaison avec les valeurs de laboratoire

	Nucléodensimètre		Laboratoire	
	Point	$\text{kg/m}^3$	Carottes	$\text{kg/m}^3$
ESG10#1	1	2389.2	CR-1	2413
	2	2400.2	CR-2	2385
	4	2380.6	CR-3	2400
	5	2300.6	CR-4	2383
	Moyenne:	2367.65	Moyenne:	2395.25
		Correction	+27.6	
GB20	1	2287.8	CR-1	2435
	2	2393.4	CR-2	2439
	4	2394.4	CR-3	2490
	5	2453.4	CR-4	2496
	Moyenne:	2382.25	Moyenne:	2465
		Correction	+82.75	

Pour leur part, les mesures collectées pour la campagne ESG10#2 doivent, en plus, être bonifiées d'une valeur de  $68 \text{ kg m}^{-3}$  (facteur associé au biais estimé pour le deuxième appareil). Le Tableau 9 fait le sommaire des valeurs corrigées, en plus de présenter les valeurs de vides ( $V_a$ ) calculés à partir de la densité maximale de chaque formule. La Figure 51 présente les vides interstitiels interpolés sur la surface de la fosse en utilisant les 21 points de mesures disponibles (un point de mesure au nucléodensimètre n'avait pas de coordonnées spatiales lors de la campagne ESG10#1). La moyenne globale des  $V_a$  est de 8,52%. Il doit cependant être noté que cette valeur est significativement influencée par le nombre non négligeable de mesures prises lors de la campagne ESG10#2, dont les coordonnées se situent en majorité dans la zone  $Y < 3000 \text{ mm}$ . L'interpolation spatiale montre que cette zone est plus dense que les autres. Ceci est probablement dû au fait que la vibration a été utilisée dans cette zone pour quelques passes de rouleau compacteur. Il est aussi constaté que le secteur  $4500 > Y > 3000 \text{ mm}$ , où sont situés plusieurs capteurs dans les couches d'EB (voir section « instrumentation » plus loin dans ce rapport), est généralement caractérisé par des  $V_a$  de 9% ou plus. Il doit être rappelé que l'atteinte de ce seuil de 9%, préférablement de 10%, a été préalablement identifiée en laboratoire comme étant une teneur en vides permettant d'obtenir un degré de saturation d'environ 45% de l'EB de surface par faible charge gravitaire.

Tableau 9. Mesures corrigées pour la masse volumique au nucléodensimètre

		X (mm)	Y (mm)	M1 (kg m <sup>-3</sup> )	M2 (kg m <sup>-3</sup> )	M3 (kg m <sup>-3</sup> )	M4 (kg m <sup>-3</sup> )	M5 (kg m <sup>-3</sup> )	Moy. (kg m <sup>-3</sup> )	Va-moy (%)
GB20	1	1162	715	2374	2366	2342	2404	2368	2371	9.84
	2	1615	1431	2480	2444	2490	2507	2461	2476	5.82
	3	1074	5226	2581	2551	2619	2553	2509	2562	2.54
	4	1507	6460	2535	2401	2470	2476	2505	2477	5.78
	5	681	6429	2516	2537	2508	2541	2580	2536	3.54
							Moy.	2484	5.50	
							É-T	74	2.81	
ESG10#1	1	1162	715	2432	2399	2436	2414	2405	2417	6.77
	2	1615	1431	2429	2425	2424	2446	2417	2428	6.35
	3	1074	5226	2388	2399	2410	2391	2396	2396	7.56
	4	1507	6460	2388	2403	2398	2441	2413	2408	7.10
	5	681	6429	2297	2327	2335	2340	2344	2328	10.19
	6	1113	1514	2462	2483	2480	2458	2449	2466	4.87
	7	1104	2883	2357	2355	2349	2348	2345	2350	9.33
	8	591	4283	2333	2316	2324	2315	2323	2322	10.44
	9*	1123	3712	2289	2282	2284	2288	2295	2287	11.77
	10	NA	NA	2359	2361	2360	2372	2375	2365	8.77
							Moy.	2377	8.31	
							É-T	56	2.14	
ESG10#2	1	1600	500	2429	2425	2404	2416	2479	2430	6.25
	2	500	500	2341	2299	2367	2303	2450	2352	9.29
	3	400	1500	2323	2319	2340	2327	2332	2328	10.20
	4	1150	2550	2524	2506	2495	2536	2493	2510	3.16
	5	400	2400	2418	2423	2423	2420	2422	2421	6.62
	6	1600	2200	2399	2355	2370	2394	2412	2386	7.97
	7*	1050	3800	2301	2278	2306	2276	2278	2287	11.76
	8	620	3000	2204	2227	2236	2229	2230	2225	14.18
	9	1550	3600	2344	2361	2350	2353	2368	2355	9.16
	10	1750	5300	2375	2419	2390	2367	2346	2379	8.23
	11	1050	4600	2353	2363	2361	2364	2383	2364	8.79
	12	500	5500	2357	2341	2350	2339	2347	2346	9.49
							Moy.	2365	8.76	
							É-T	72	2.77	

\*Points utilisés pour établir un facteur de correction pour l'appareil de mesure (les coordonnées sont très rapprochées)

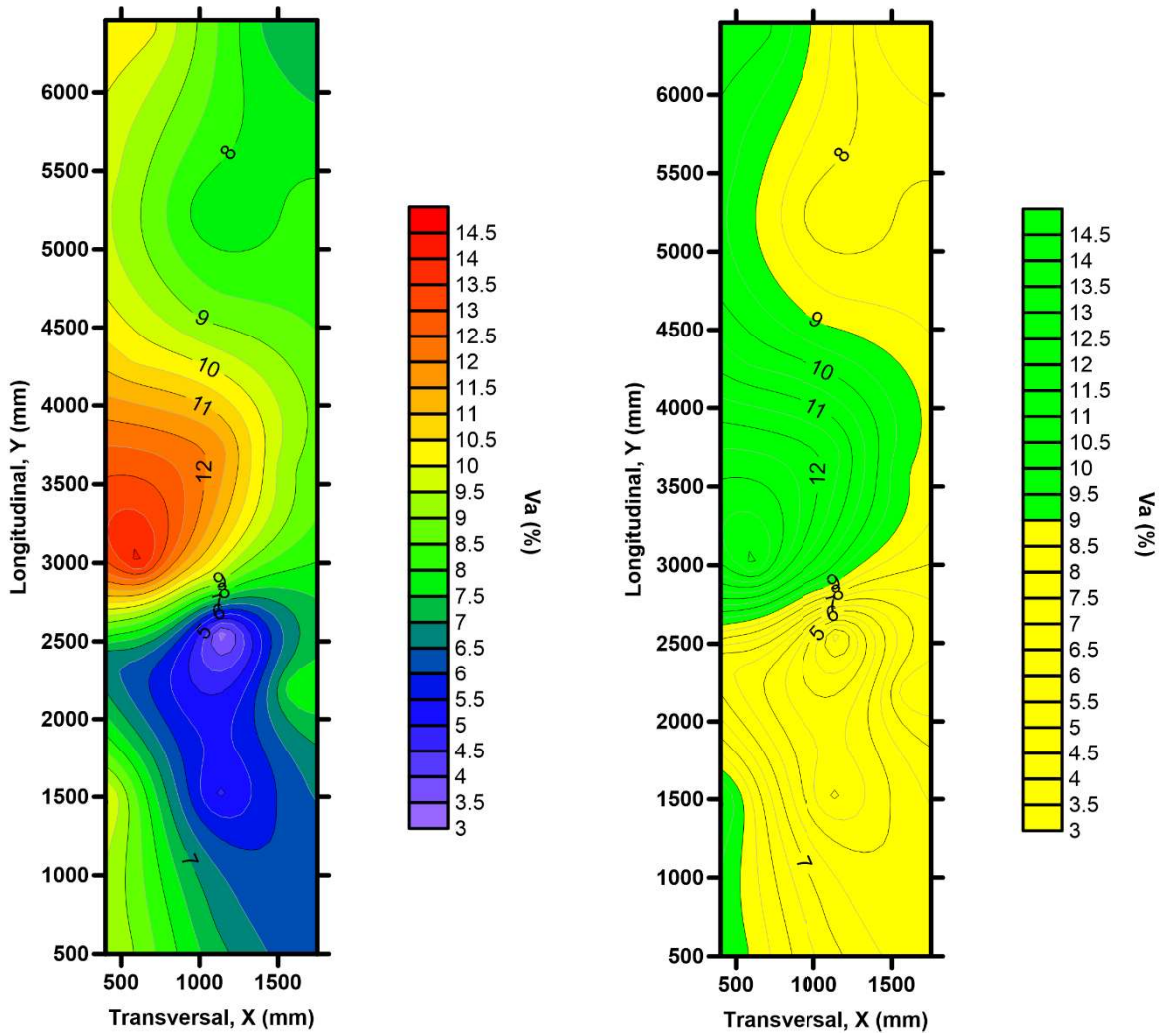


Figure 51. Interpolation spatiale par krigeage des vides interstitiels dans le ESG10

#### 8.4.1 Mesure de la compacité par la prise de masse du camion

Une estimation des vides a aussi été effectuée par pesée du camion. À l'arrivée du véhicule, la masse sur chacun des essieux a été enregistrée. Elle a ensuite été reprise suite à l'épandage du ESG10 sur la surface à paver. La différence de masse totale est la masse qui a été mise sur la surface de la fosse. Le Tableau 10 fait la synthèse des masses mesurées avant et après mise en œuvre sur chaque essieu et côté du camion. La Figure 52 présente la mesure de la masse avec une balance à essieux.

Tableau 10. Pesée du camion lors de la mise en œuvre du ESG10

	Côté	Masse (kg)			Total
		Essieu arrière 2	Essieu arrière 1	Essieu avant	
Avant pavage	Gauche	3240	3260	2050	17310
	Droite	3100	3580	2080	
Après pavage	Gauche	2715	2760	1930	15085
	Droite	2690	3100	1890	
Masse étendue (soustraction des totaux)					2225



Figure 52. Pesée des essieux du camion

La surface à couvrir avec le ESG10 a été estimée à 13,911625 m<sup>2</sup>. Tel que présenté au Tableau 2, la couche de ESG10 a une épaisseur finale de 67,9 mm en moyenne. Ainsi, il est possible de calculer que le pourcentage de vides (%Va) en utilisant comme données : Épaisseur (H) = 0.0679 m, Surface (A) = 13.911625 m<sup>2</sup>, Masse étendue (M) = 2225 kg et Densité maximale (D<sub>mm</sub>) = 2600.

L'Équation 2 est utilisée pour le calcul du pourcentage de vides. Celle-ci est définie par

$$\%V_a = 100 - 100 \times \left( \frac{M / (H \times A)}{D_{mm} \times 0.997044} \right) \quad \text{Équation 2}$$

et permet d'obtenir un pourcentage de vides calculé de 9,1%.

## 8.5 Récapitulatif des Va

Le Tableau 11 présente une synthèse des vides interstitiels calculés selon les trois approches considérées dans cette section. Il doit être mentionné que la méthode de laboratoire est considérée comme base de référence. Néanmoins, il est constaté qu'une variation allant de 7,9 % à 9,1 % a été obtenue entre les méthodes.

Tableau 11. Récapitulatif des vides obtenus par trois méthodes dans les couches d'enrobé

	GB20		ESG10		
	Laboratoire	Nucléodensimètre	Laboratoire	Nucléodensimètre	Pesée
Va (%)	6,53	5,50	7,89	8,52	9,14

## 9 Instrumentation

À toutes les étapes de la construction de la fosse, des instruments de mesures ont été installés dans les couches de sols, matériaux granulaires et enrobés bitumineux. De façon générale, les instruments ont été positionnés et sélectionnés afin de mesurer les contraintes, déformations, teneur en eau et température dans les différentes couches, aux endroits pertinents, en prenant en compte diverses considérations pratiques et limitations associées à l'environnement de la fosse.

À titre de référence pour les prochaines sections, la Figure 54 représente un schéma de l'ensemble des instruments mis en place dans la chaussée expérimentale, à l'exception des jauges de déformation dans l'enrobé bitumineux, dont la position sera détaillée dans une section ultérieure dans ce rapport. La figure permet de rassembler, notamment, l'information sur la position des instruments, le numéro de série/capteur et sur la stratigraphie.

Lors de la lecture des sections suivantes, portant sur les divers instruments installés dans la section de chaussée expérimentale, le lecteur est prié de se référer à la Figure 53 pour compléter l'information qui sera présentée.

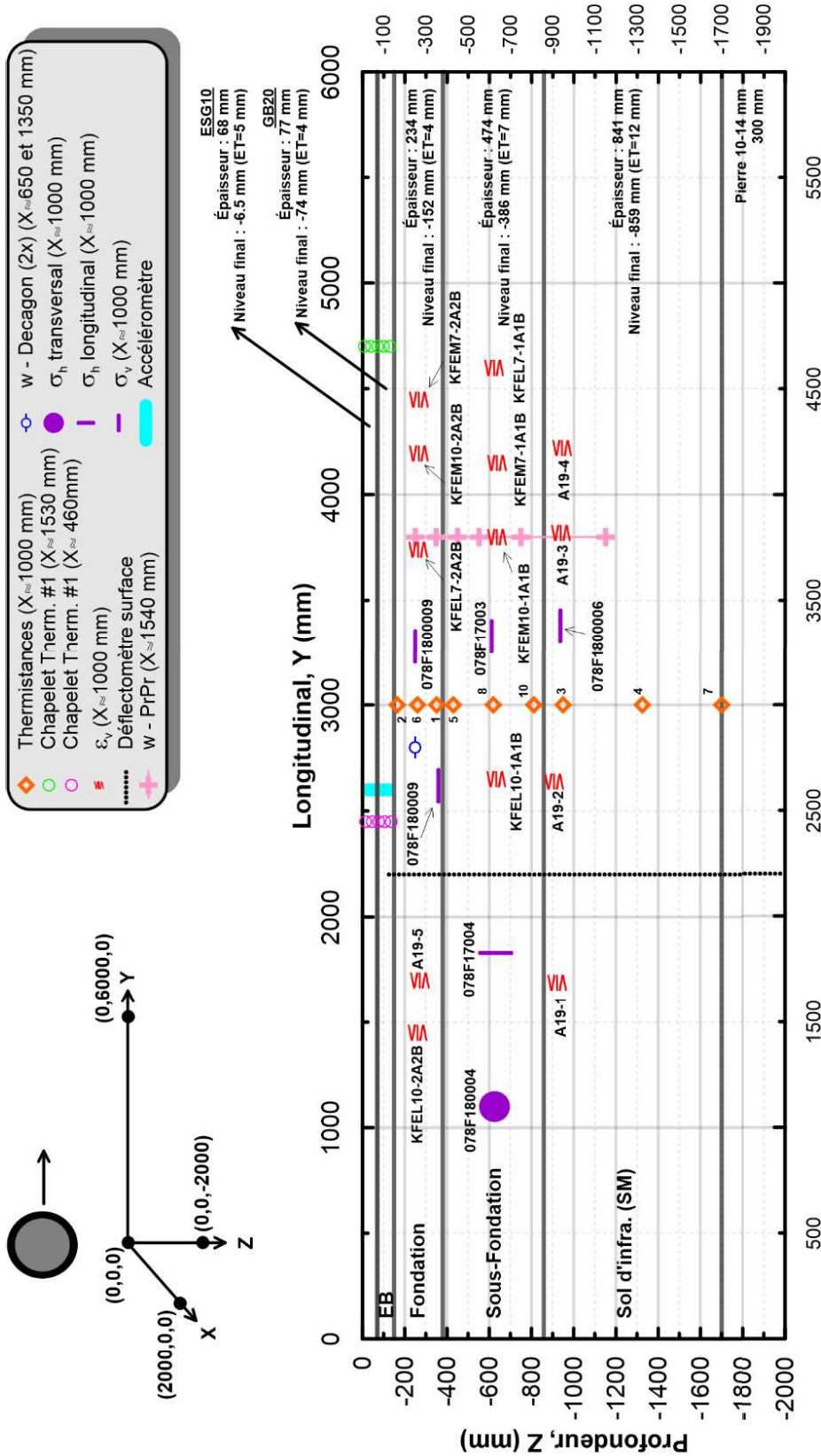


Figure 53. Position des différents instruments à l'exception des jauges de déformation dans l'enrobé



## 9.1 Thermistances

Des thermistances de modèle Littelfuse PR222J2 ont été installées sur toute la profondeur des couches de sol et de matériaux granulaires. Le Tableau 12 présente la position des thermistances dans le massif de la chaussée. Celles-ci sont positionnées au centre de la fosse, à raison de trois thermistances par couche. L'équation de calibration standard Steinhart-Hart est utilisée pour la conversion des mesures. L'installation des thermistances est présentée à la Figure 54. Comme le sol d'infrastructure a été conservé du projet précédent, et que les anciennes thermistances ont été endommagées lors de la déconstruction, une excavation a été effectuée au centre de la fosse jusqu'au niveau du sommet de la couche de pierre nette (Figure 54a). La thermistance la plus profonde a été installée sur le géotextile par-dessus la pierre nette (Figure 54b). La Figure 54c montre l'installation d'une thermistance dans le sol d'infrastructure. Près des thermistances, du matériau passant le tamis 5 mm a été utilisé afin de protéger les capteurs. Tout au long du processus d'installation des thermistances, le sol et les matériaux granulaires ont été compactés dans le secteur des capteurs. Notamment, l'assise des thermistances a été compactée jusqu'à la profondeur désirée. Par la suite, lorsque la thermistance a été installée, une compaction manuelle a été effectuée dans le secteur de l'instrument et l'équipement de compactage mécanique a été utilisé au-dessus des instruments lorsqu'un recouvrement d'environ 150 mm était en place.

*Tableau 12. Position des thermistances dans les couches de sol et de matériaux granulaires*

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Numéro
INFRA	1000	3000	-1700	7
	1000	3000	-1325	4
	1000	3000	-950	3
MG112	1000	3000	-810	10
	1000	3000	-620	8
	1000	3000	-430	5
MG20	1000	3000	-352	1
	1000	3000	-260	6
	1000	3000	-165	2



Figure 54. Installation des thermistances dans le sol et les matériaux granulaires, a) excavation dans le sol d'infrastructure, b) Positionnement de la thermistance au bas de la fosse, c) Installation des thermistances dans le sol

Des thermistances (modèle YSI 44033) ont aussi été installées dans la couche d'enrobé bitumineux afin d'obtenir un profil thermique détaillé de cette couche. Deux chapelets de cinq thermistances chacun ont été insérés dans des trous percés sur environ 150 mm de profondeur dans l'enrobé. Le diamètre des trous est de 10 mm. La Figure 55 et la Figure 56 présentent le chapelet de thermistances, le trou d'installation, ainsi que l'instrument installé. De la colle epoxy a été utilisée pour combler le trou dans lequel a été inséré le chapelet de thermistances.

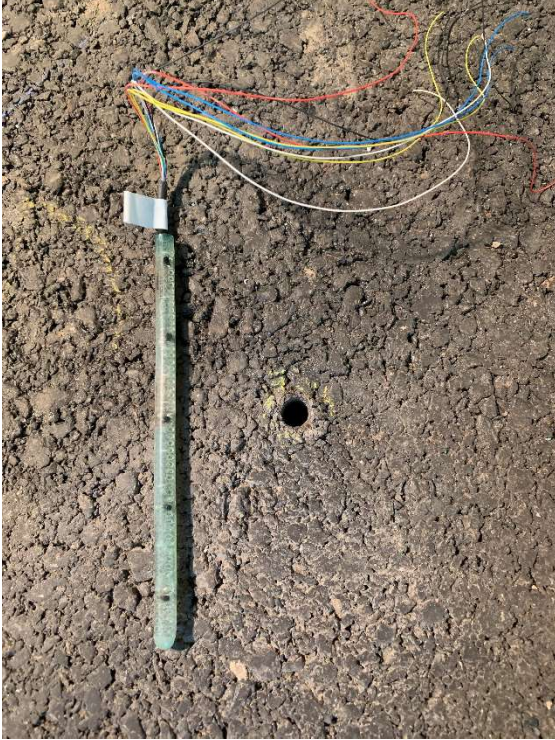


Figure 55. *Chapelet de thermistances*

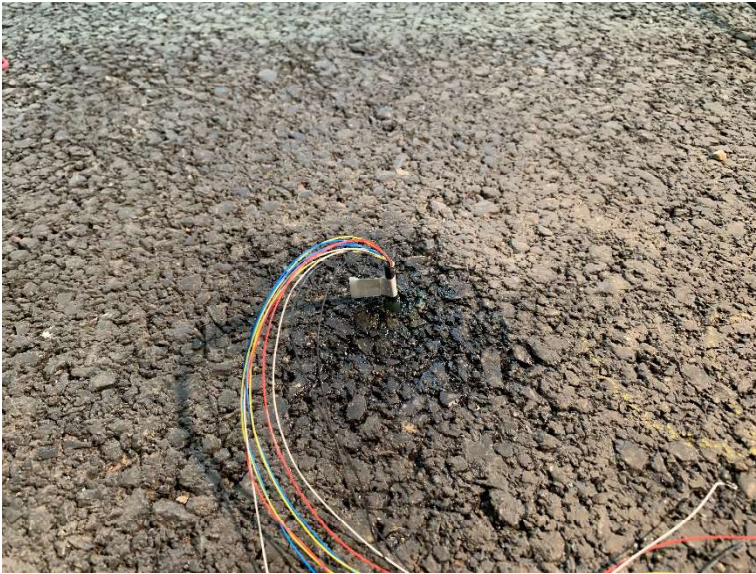


Figure 56. *Chapelet de thermistances installé dans l'enrobé bitumineux*

Le positionnement des thermistances dans l'enrobé a été sujet à certaines contraintes. La configuration du capteur fait en sorte que les fils sortent du chapelet à la verticale. Il a donc fallu installer les chapelets en dehors de la zone d'action des pneus. De plus, en raison de la présence de nombreux câbles d'instruments dans le pavage entre pour  $3000 < Y < 4700$  mm, ce secteur a été évité. Néanmoins, en direction Y, la position de chaque chapelet a été choisie afin que la moyenne des positions longitudinales soit environ centrée sur la zone des capteurs de déformation dans l'enrobé. Le Tableau 13 rassemble les coordonnées des thermistances installées dans l'enrobé bitumineux. Celles-ci sont espacées de 30 mm verticalement. La configuration permet d'avoir, notamment, une thermistance positionnée environ à l'interface entre les deux couches d'enrobé.

Tableau 13. Position des chapelets de thermistances installés dans l'enrobé bitumineux

Chapelet #1		Chapelet #2		Profondeur	
X	Y	X	Y	Z <sub>rel</sub> (mm)*	Z (mm)**
				-10	-16.5
				-40	-46.5
1530	4700	460	2450	-70	-76.5
				-100	-106.5
				-130	-136.5

\*Profondeur relative par rapport à la surface de l'enrobé

\*\* Profondeur absolue estimée à partir de la profondeur moyenne de la surface de l'enrobé par rapport à la surface du béton

L'annexe H fait le sommaire de la calibration des chapelets de thermistances.

## 9.2 Cellules de contrainte

Des cellules électriques de contraintes de marque Roctest (modèle TPC) ont été installées dans le sol et dans les couches granulaires. Les cellules ont un diamètre de 229 mm. Des cellules d'une capacité de 210 kPa et 105 kPa ont été utilisées. Les cellules avec une plus forte capacité ont été utilisées plus près de la surface. Une cellule de contrainte verticale a été positionnée au milieu de chaque couche de matériau granulaire, en plus d'une supplémentaire à l'interface entre la fondation et la sous-fondation. Dans le sol d'infrastructure, la cellule de contrainte verticale est

positionnée environ 75 mm sous la surface. Cet emplacement correspond environ à la mi-profondeur des capteurs de déformations qui sont placés dans le sol (discuté plus loin dans ce rapport). Cela permet de faire une estimation de la rigidité en associant la contrainte et la déformation à un même horizon dans un matériau donné.

Pour l'installation des capteurs de contraintes, la couche dans laquelle le capteur doit être inséré a d'abord été mise en œuvre. Par la suite, une excavation locale (Figure 57) a été effectuée afin de mettre en place les cellules. Une attention particulière a été portée à ce que l'assise du capteur soit au niveau et bien densifiée. Une fine couche de matériau passant le tamis de 5 mm a été utilisée sous et par-dessus les cellules de contraintes. Le niveau de chaque capteur a été vérifié avant de remplir l'excavation (Figure 58). Le matériau a été compacté manuellement dans le premiers 150 mm au-dessus du capteur, et du compactage mécanisé a été utilisé par la suite.



Figure 57. Excavations locales pour l'installation des cellules de contraintes



Figure 58. Mise à niveau des cellules de contrainte

Les cellules de contraintes sont toutes positionnées transversalement à approximativement X=1000 mm. Le Tableau 14 présente le sommaire des cellules de contraintes verticales utilisées, ainsi que leur position, identification et capacité.

Tableau 14. Position et identification des cellules de contrainte dans la chaussée expérimentale

Matériau	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	#SN	Axe	Capacité
INFRA	980	3380	-935	078F1800006	Vertical	15 psi
MG112	1000	3329	-612	078F17003	Vertical	30 psi
MG112	1020	1830	-630	078F17004	Longitudinal	30 psi
MG112	1000	1100	-625	078F180004	Transversal	15 psi
MG112-MG20	980	2620	-360	078F180009	Vertical	30 psi
MG20	980	3280	-250	078F180009	Vertical	30 psi

Selon le plan d'instrumentation initial, trois capteurs de contrainte verticale ( $\sigma_1$ ) devaient être installés. Finalement, suite aux opérations de construction, un total de six cellules a été mis en place. Pour des besoins expérimentaux dépassant le cadre de cette étude, il doit être précisé que des cellules de contraintes transversales ( $\sigma_2$ ) et longitudinales ( $\sigma_3$ ) ont aussi été installées dans la sous-fondation. Il n'est pas prévu d'en faire l'analyse dans le cadre de ce projet.

### 9.3 Déflectomètre de surface et accéléromètre

La réponse globale de la structure de chaussée est évaluée à l'aide d'un déflectomètre de surface et d'un accéléromètre (PCB piezotronics 393B31). Il est probable qu'un décollement de l'interface et de la perte de solidarité entre les deux couches d'enrobé puisse conduire à un changement dans la réponse globale de la chaussée, soit dans l'amplitude des réponses ou dans le signal. Ces deux méthodes de mesure ont été installées notamment pour effectuer ce type de détection et pour faire l'évaluation de la condition structurale de la chaussée. Il est aussi possible d'obtenir le bassin de déflexion sous la charge roulante. Les variations d'accélération devraient également pouvoir être convertis en déplacement vertical.

Tel que montré à la Figure 59, le déflectomètre de surface consiste en un potentiomètre fixé sur une plaque métallique servant de couvercle à une tête de mesure insérée dans un trou de carottage dans l'enrobé. Le trou de carottage est de 63,5 mm. Une tige de référence est ancrée et fixe tout au fond de la fosse. L'extrémité de la tige est accessible au centre de la tête de mesure. La tête de mesure est quant à elle étanche et fixé sur l'enrobé avec de la colle époxy. Le design de la tête de mesure a été prévu afin d'injecter la colle, très liquide, sur tout le pourtour de la tête de mesure dans l'objectif de s'assurer de l'étanchéité puisque de l'eau sera utilisée en surface de l'enrobé.

Le déflectomètre de surface est positionnée en X=1000 mm et Y=2200 mm.



Figure 59. Déflectomètre de surface, a) Tête de mesure métallique collée, b) Potentiomètre fixé sur le couvercle

L'accéléromètre est également inséré dans un trou de carottage de 63,5 mm. Dans ce cas-ci, l'instrument est positionné sur la surface du gravier retravaillée, recompressée et nivelée. La Figure 60 présente le capteur et son insertion dans la chaussée. Le capteur est inséré et figé dans de la paraffine liquide fondue à environ 60 °C. Le trou de carottage a d'abord été chauffé et la paraffine liquide y a été versée. Le capteur a ensuite immédiatement été inséré dans le liquide. Suite au refroidissement, le capteur se retrouve fixé dans l'enrobé et le trou devient alors étanche.

L'accéléromètre est positionné en X=1000 mm et Y=2600 mm.



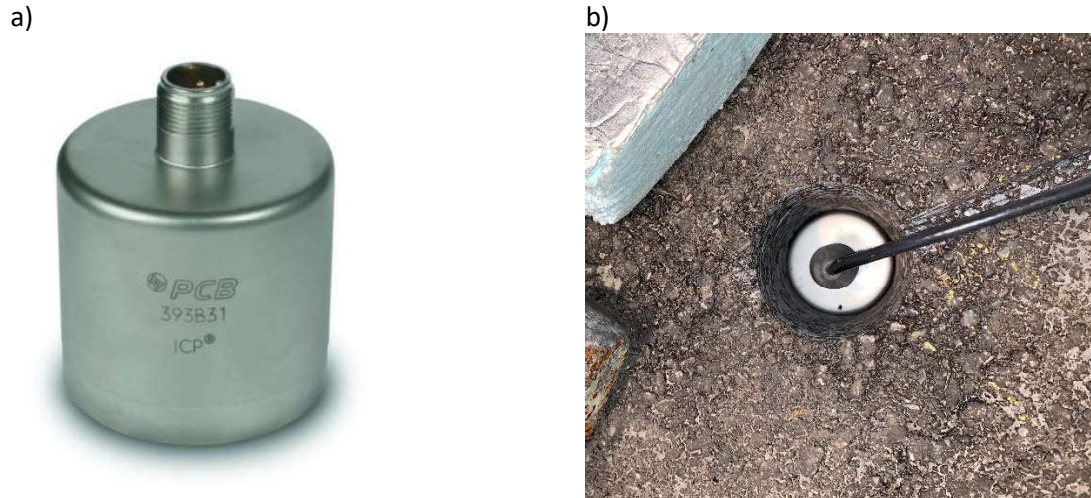


Figure 60. a) Accéléromètre PCB393B31, b) Insertion de l'instrument dans le trou de carottage

#### 9.4 Teneur en eau

Dans l'objectif de mesurer la teneur en eau dans le sol et les matériaux granulaires, deux types d'instruments ont été implantés dans la chaussée, soit deux sondes Decagon EC-5 et une sonde multiniveaux de type ProfileProbe PR6 (DeltaT devices). Ces instruments seront utilisés pour mesurer les variations relatives de la teneur en eau dans les couches de sol et matériaux granulaires. Dans les deux cas, leur positionnement a été prévu en fonction des principaux points d'infiltration par lesquels l'eau appliquée sur la surface de l'enrobé pourrait s'infiltrer sous les couches bitumineuses. Ces points critiques sont les jonctions latérales entre l'enrobé et les parois de la fosse, ainsi que les instruments positionnés au centre de la chaussée en direction transversale, par exemple le déflectomètre de surface. Ainsi, les sondes de mesure de la teneur en eau (Decagon) sont positionnées approximativement à  $X=500$  et  $X=1500$  mm, soit la position transversale médiane entre les points critiques. Dans le cas de la sonde multiniveaux ProfileProbe, le positionnement devait aussi être hors du champ d'action des roues. Les Figure 61 et Figure 62 présentent l'installation des capteurs.



*Figure 61. Installation de la sonde Decagon dans une excavation locale à la mi-couche dans la fondation*

Dans le cas des deux sondes Decagon, elles ont été implantées dans deux excavation locales. Du matériau passant le tamis de 5 mm a été utilisé autour de la sonde afin de la protéger. Pour la sonde multiniveaux ProfileProbe, celle-ci doit être insérée dans un tube de Kevlar préalablement implanté dans la structure de chaussée (Figure 62). Six capteurs sont placés sur la sonde afin d'obtenir un profil vertical de teneur en eau (Figure 63). Le Tableau 15 fait le sommaire du positionnement des capteurs de teneurs en eau.



Figure 62. Tube d'insertion pour la sonde multiniveaux ProfileProbe



Figure 63. Capteurs de teneur en eau multiniveaux ProfileProbe (PrPr)

Tableau 15. Position des capteurs de teneur en eau

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	#Série
ProfileProbe	1540	3800	-250, -350, -450, -550, -750, -1150	
Decagon #1	1350	2800	-250	SN12633-04-858
Decagon #2	650	2800	-250	SN#2

## 9.5 Capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires

Des capteurs de déformation verticale ont été installés dans le sol et les matériaux granulaires. Pour la couche de sol, le capteur a été positionné de façon à ce que le plateau du dessus du capteur soit au sommet de la couche de sol d'infrastructure. Pour les matériaux granulaires, les capteurs ont été positionnés de façon à ce que le centre du capteur soit positionné au centre de la couche. La Figure 64 présente une photo du type de capteurs utilisé, et la Figure 65 une présentation schématique des capteurs.



Figure 64. Capteur de déformation verticale

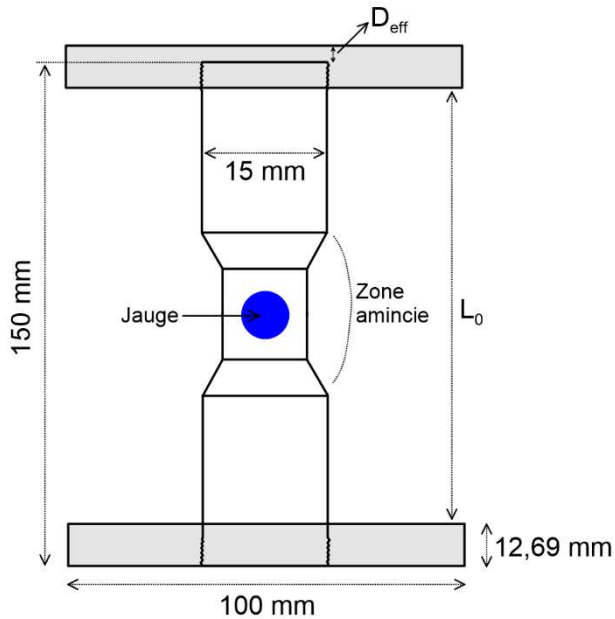


Figure 65. Schéma des capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires

Ces capteurs sont fabriqués à l'Université Laval par l'équipe de recherche. Les capteurs consistent en une tige de plastique (PVC) de 15 mm de diamètre et 150 mm de longueur, dont chaque extrémité est filetée afin de fixer des plateaux en aluminium sur les parties supérieure et inférieure. Les plateaux d'aluminium ont une épaisseur de 12,69 mm et un diamètre de 100 mm. La tige de plastique est amincie au centre et une section plate est utilisée pour coller une jauge de déformation. L'amincissement est utilisé afin d'amplifier le signal de la jauge de déformation.

Selon le plan d'instrumentation initial, il était prévu d'installer trois capteurs de déformation verticale, à raison d'un capteur par couche de sol ou de matériau granulaire. Pour des besoins de recherche et développement pour ces capteurs, un total de treize jauges ont été installées, toutes pour des mesures dans l'axe vertical. Ces capteurs diffèrent par les différentes capacités des jauges de mesure collées sur la partie centrale de l'instrument, ainsi que par le diamètre de la zone amincie au centre de la tige de plastique (7 mm et 10 mm ont été utilisés).

Les jauges de déformation verticale sont toutes positionnées transversalement à approximativement à  $X=1000$  mm. Le Tableau 16 présente le sommaire de l'information pertinente est lien avec l'installation des capteurs de déformation verticale. La longueur  $L_0$  est utilisée comme référence pour le calcul de la déformation. Cette dernière est obtenue suite aux

mesures prises lors de l'installation, notamment  $D_{eff}$ , qui correspond au niveau de serrage réel in situ pouvant être appliqué sur le plateau supérieur. La valeur de  $L_0$  est alors obtenue par

$$L_0 = 150 - 2 \times 12.69 + D_{eff} \quad \text{Équation 3}$$

dans laquelle  $D_{eff}$  est en mm.

Tableau 16. Position, identification et propriétés des capteurs de déformation verticale dans le sol et les matériaux granulaires

Matériau	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	#ID	Axe	$D_{eff}$ (mm)	$L_0$ (mm)	* $Z_{jauge}$ (mm)
INFRA	1010	1690	-845	A19-1	Vertical	3.94	128.56	-922
INFRA	1000	2640	-830	A19-2	Vertical	3.03	127.65	-907
INFRA	1010	3820	-860	A19-3	Vertical	4.54	129.16	-937
INFRA	990	4220	-867	A19-4	Vertical	2.75	127.37	-943
MG112	950	2650	-555	KFEL10-1A1B	Vertical	5.65	130.27	-633
MG112	980	3800	-560	KFEM10-1A1B	Vertical	3.88	128.5	-637
MG112	990	4150	-560	KFEM7-1A1B	Vertical	2.7	127.32	-636
MG112	1000	4600	-545	KFEL7-1A1B	Vertical	4.51	129.13	-622
MG20	980	1450	-185	KFEL10-2A2B	Vertical	3.78	128.4	-261.89
MG20	1000	1700	-195	A19-5	Vertical	2.79	127.41	-271.395
MG20	980	3740	-185	KFEL7-2A2B	Vertical	4.76	129.38	-262.38
MG20	980	4195	-190	KFEM10-2A2B	Vertical	3.72	128.34	-266.86
MG20	1000	4450	-190	KFEM7-2A2B	Vertical	3.22	127.84	-266.61

\*Profondeur Z de la jauge de déformation collée au centre du capteur

Les capteurs ont tous été calibrés en appliquant différents niveaux de charge verticale, pour lesquels le déplacement absolu (en mm) du plateau de chargement supérieur a été mesuré. Ce déplacement est associé à la lecture de la jauge de déformation collée au centre du capteur. L'annexe I regroupe l'ensemble des calibrations effectuées pour ces capteurs.

En ce qui concerne l'installation, les capteurs sont installés dans des excavations locales, en prenant soin de mettre au niveau et de compacter adéquatement l'assise du capteur, faite de

matériau passant le tamis 5 mm. Le sol est adéquatement recompacté dans le secteur du capteur avec de l'équipement adapté, en prenant soin que la jauge et les câbles soient entourés de matériau tamisé au tamis de 5 mm.



*Figure 66. Excavation locale pour l'installation des capteurs de déformation*



Figure 67. Capteurs de déformation verticale installés dans le sol d'infrastructure

## 9.6 Capteurs de déformation longitudinales et transversales dans l'enrobé bitumineux

La mesure des déformations dans le système bi-couche d'enrobé bitumineux est l'élément central de ce projet de recherche. Ainsi, un nombre important de capteurs de déformation a été installé à divers horizons dans le bi-couche, dans les directions longitudinales (Y) et transversales (X). Les capteurs utilisés sont des KM-HAS (TML) (Figure 68 and Figure 69). Ces capteurs ont une longueur de référence de 100 mm et un diamètre de 17 mm pour le corps central du capteur. Le bi-couche est constitué d'une couche de base en GB20 et d'une couche de surface en ESG10. Les capteurs ont été positionnés à la base du revêtement, soit au bas de la couche de base (GB20), au sommet de la couche de base (GB20), ainsi que à la base de la couche de surface (ESG10). Un total de quatorze capteurs a été mis en place. Tableau 17 présente les sommaire des informations pertinentes sur les capteurs de déformation implantés dans les couches d'enrobé. Les capteurs



ont tous été installés dans le secteur  $3500 < Y < 4700$  mm, et sous chacune des roues du jumelé, approximativement, ce qui correspond à  $X=780$  mm (axe 1) et 1135 mm (axe 2). Pour les capteurs installés au niveau des fonds de couches, ces positions sont la meilleure estimation de la position transversale finale des capteurs, car il n'est pas possible de mesurer leur position suite à la mise en œuvre.

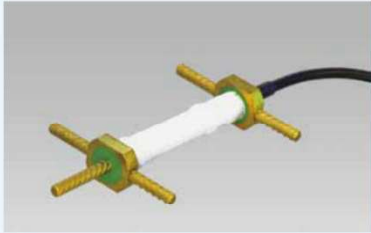
Tableau 17. Positions et informations sur les capteurs de déformation dans les couches d'enrobé

Matériau	X* (mm)	Y* (mm)	Z** (mm)	#ID	Axe	Horizon
GB20	780	3525	-131.5	EKZ180390	Longitudinal	Base
GB20	1135	4025	-133.5	EKZ180391	Longitudinal	Base
GB20	780	4025	-131.5	EKZ180392	Transversal	Base
GB20	1135	4525	-131.5	EKZ180393	Transversal	Base
GB20	817	3757	-91.5	EKZ180234	Longitudinal	Sommet
GB20	1182	4227	-92.5	EKZ180339	Longitudinal	Sommet
GB20	842	4747	-92.5	EKZ180389	Longitudinal	Sommet
GB20	817	4252	-91.5	EKZ180238	Transversal	Sommet
GB20	1177	4757	-90.5	EKZ180338	Transversal	Sommet
ESG10	780	3525	-63.5	EKZ180232	Longitudinal	Base
ESG10	1135	4025	-63.5	EKZ180229	Longitudinal	Base
ESG10	780	4525	-66.5	EKZ180233	Longitudinal	Base
ESG10	780	4025	-65.5	EKZ180231	Transversal	Base
ESG10	1135	4525	-61.5	EKZ180230	Transversal	Base

\*Les positions X et Y correspondent au centre (en plan) du capteur

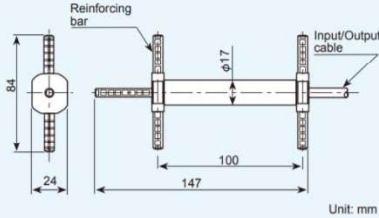
\*\* La position Z correspond au centre du capteur

**STRAIN TRANSDUCER KM-HAS for asphalt pavement**



These transducers are embedded into asphalt for measurement of internal strain. They have reinforcing bar flanges at its both ends for good fixation to asphalt pavement materials. The operating temperature range of the transducer is -20 to +180°C, and they have fully waterproof construction.

CE



Unit: mm

■ SPECIFICATIONS

Type	KM-100HAS
Capacity	$\pm 5000 \times 10^{-6}$ strain
Gauge length	100mm
Rated output	Approx. 2.5mV/V (5000 $\times 10^{-6}$ strain)
Non-linearity	1%RO
Apparent elastic modulus	Approx. 40N/mm <sup>2</sup>
Integral temperature	3500 Full bridge : strain measurement Quarter bridge 3-wire method : temperature measurement
Temperature range	-20 to +180°C
Bridge excitation	Recommended 1-2V, Allowable 10V
Input/Output cable	$\phi$ 6mm 0.3mm <sup>2</sup> 5-core shielded Fluoroplastic cable, 2m

[https://ase.au.dk/fileadmin/www.ase.au.dk/Filer/Laboratorier\\_og\\_vaerksteder/Instrument\\_Depotet/Udstyr/Strain\\_gauges/TML\\_Strain\\_Gauge\\_Catalog\\_2017.pdf](https://ase.au.dk/fileadmin/www.ase.au.dk/Filer/Laboratorier_og_vaerksteder/Instrument_Depotet/Udstyr/Strain_gauges/TML_Strain_Gauge_Catalog_2017.pdf)

Figure 68. Schéma des jauges TML

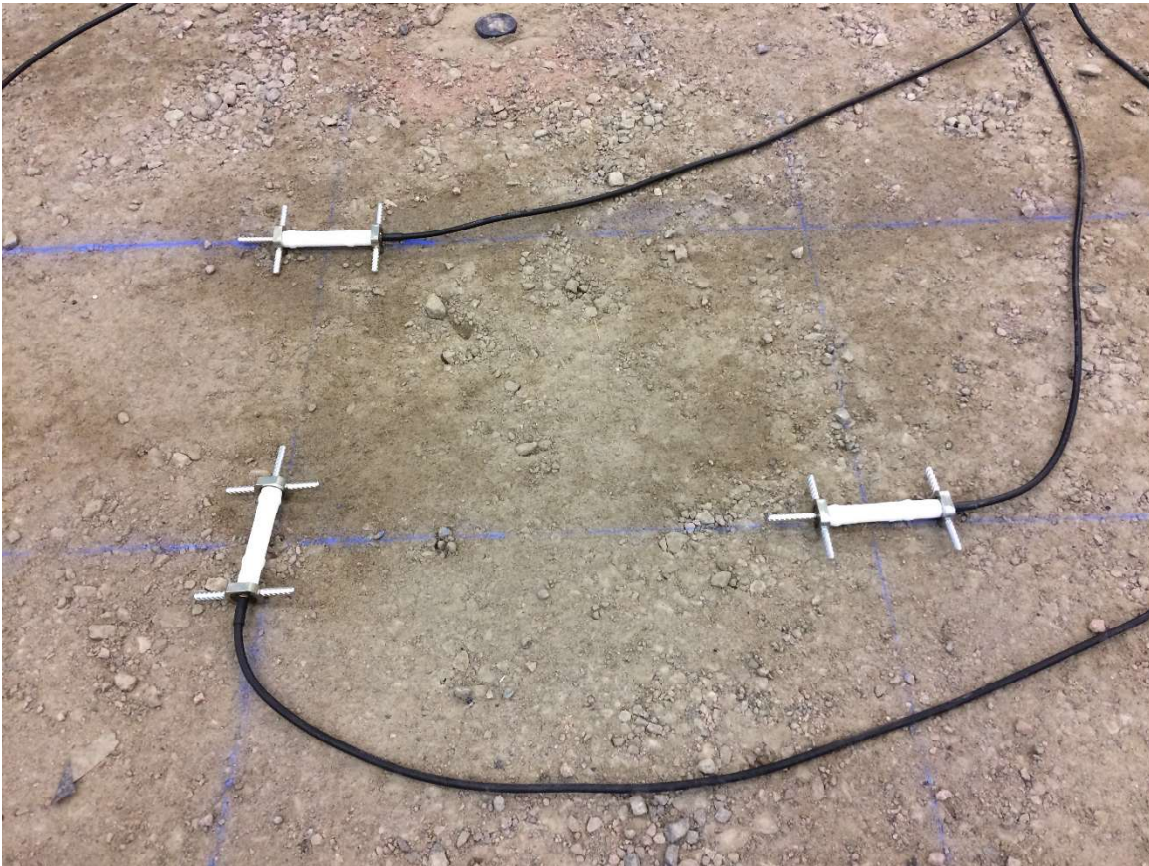


Figure 69. Jauges TML utilisées pour la mesure des déformations dans les couches d'enrobé

Les capteurs ont été installés en se référant aux guides de bonnes pratiques proposé par le fabricant et sur l'expérience d'installation pour ce type de capteurs à l'Université Gustave Eiffel. Tel que présenté à la Figure 70 et à la Figure 71, pour les capteurs installés au bas d'une couche (GB20 ou ESG10), les jauges ont été posées et référencées sur un lit de matériau tamisé chaud, légèrement enfoncées dans le lit et recouvertes de matériau tamisé chaud. Par la suite, le matériau entourant le capteur a été compacté manuellement à l'aide d'une plaque de compactage.



Figure 70. Installation des capteurs TML à la base de la couche de GB20



Figure 71. Installation des capteurs TML à la base de la couche de ESG10

Pour les capteurs situés au sommet de la couche de base en GB20, il a été nécessaire d'insérer des moules répliquant la forme des capteurs (Figure 72). Ces moules ont été positionnés sur le GB20 après qu'une passe de compacteur ait été effectuée. Après avoir enfoncé les moules dans le GB20 aux bonnes positions, le compactage s'est poursuivi normalement (Figure 73). Il doit être noté que les moules bougeaient un peu lors du passage du compacteur. Ainsi, les positions finales relevées ne sont pas toujours directement sur les distances transversales prévues (Tableau 17). Suite au refroidissement partiel du pavage, les moules ont été retirés (Figure 74).

a)



b)

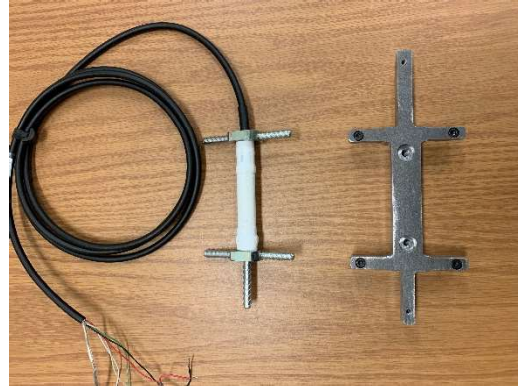


Figure 72. Moules de forme des jauges TML, a) vue de côté, b) vue de dessus

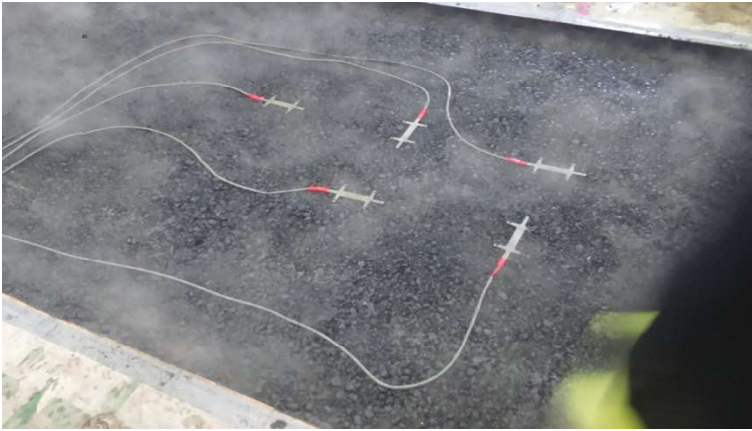


Figure 73. Moules de forme des TML lors du compactage du GB20

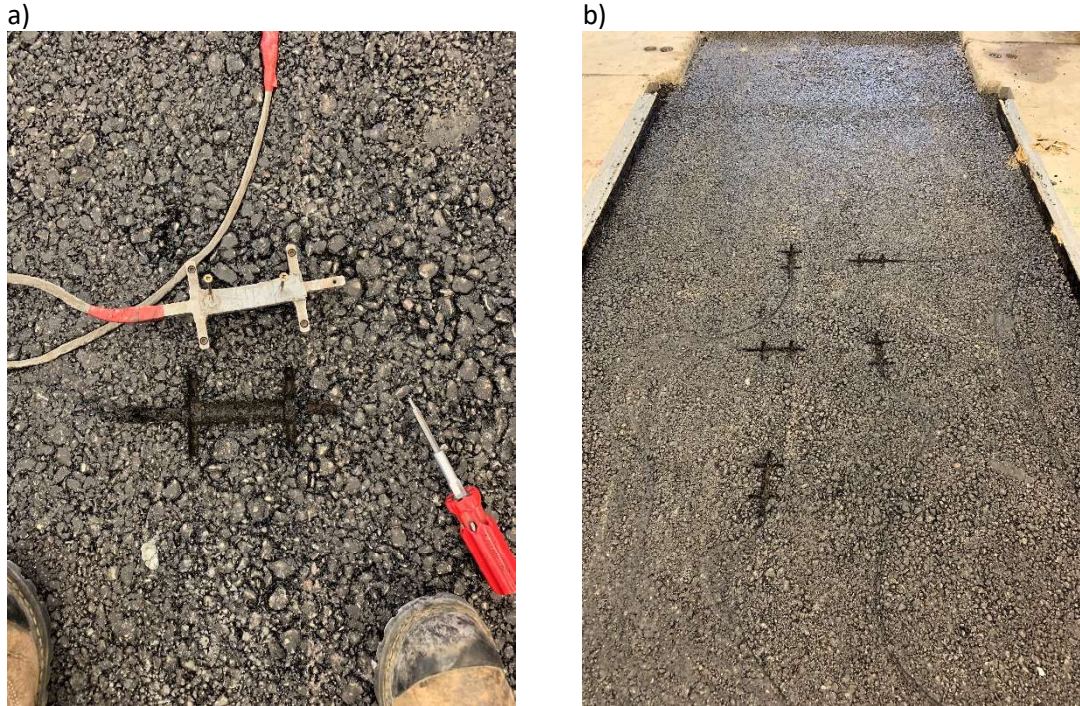


Figure 74. a) Retrait des moules au sommet de la couche de base, b) Cinq empreintes de TML au sommet de la couche de base

En vue d'installer et de fixer les jauges TML au sommet du GB20, il a aussi été nécessaire de tracer des cavités permettant d'accommoder les câbles dans le GB20. Ces traits ont été exécutés avec un marteau mécanique muni d'une pointe permettant de trancher l'enrobé (Figure 75a). De la colle siliconée a été utilisée pour combler les cavités une fois les câbles mis en place. Les empreintes ont également été brossée avec un outil pneumatique (Figure 75b). Cette étape a permis de maximiser l'exposition des granulats dans l'empreinte, ce qui permet de maximiser l'adhésion entre les jauges TML et l'enrobé. Finalement, les jauges TML ont été mises en place et collées avec de la colle epoxy (Figure 75c). Suite à la prise de la colle, la surface de la colle a été brossée afin de maximiser l'adhésion avec les couches susjacentes.

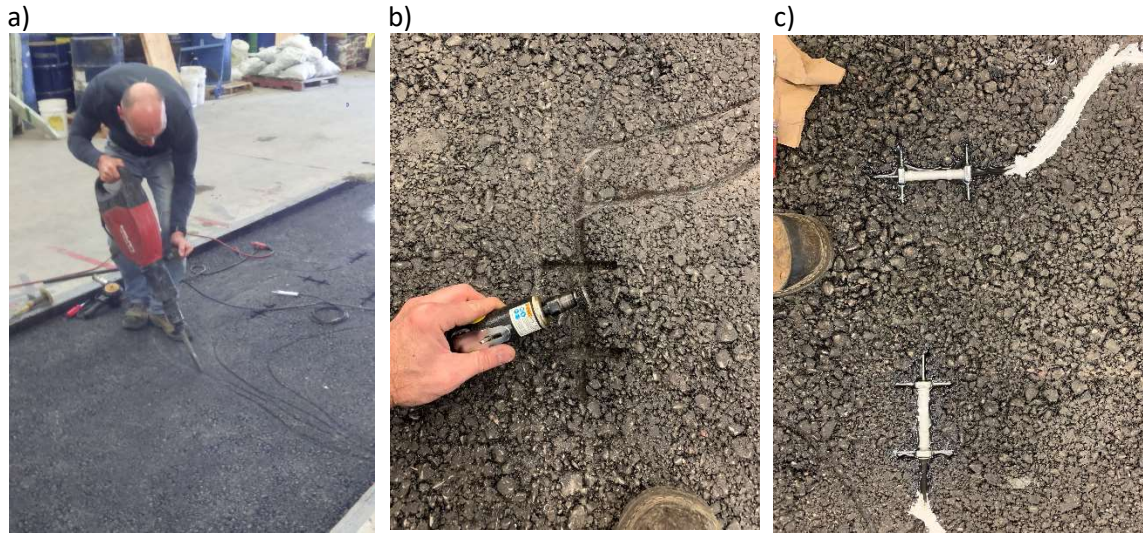


Figure 75. a) Traçage des cavités pour les câbles, b) Nettoyage et brossage des empreintes pour maximiser l'adhésion de la colle avec l'asphalte, c) Mise en place des jauges avec de la colle epoxy

Les Figure 76 et Figure 77 présentent les positions finales des jauges TML implantées dans les deux couches d'enrobé bitumineux.

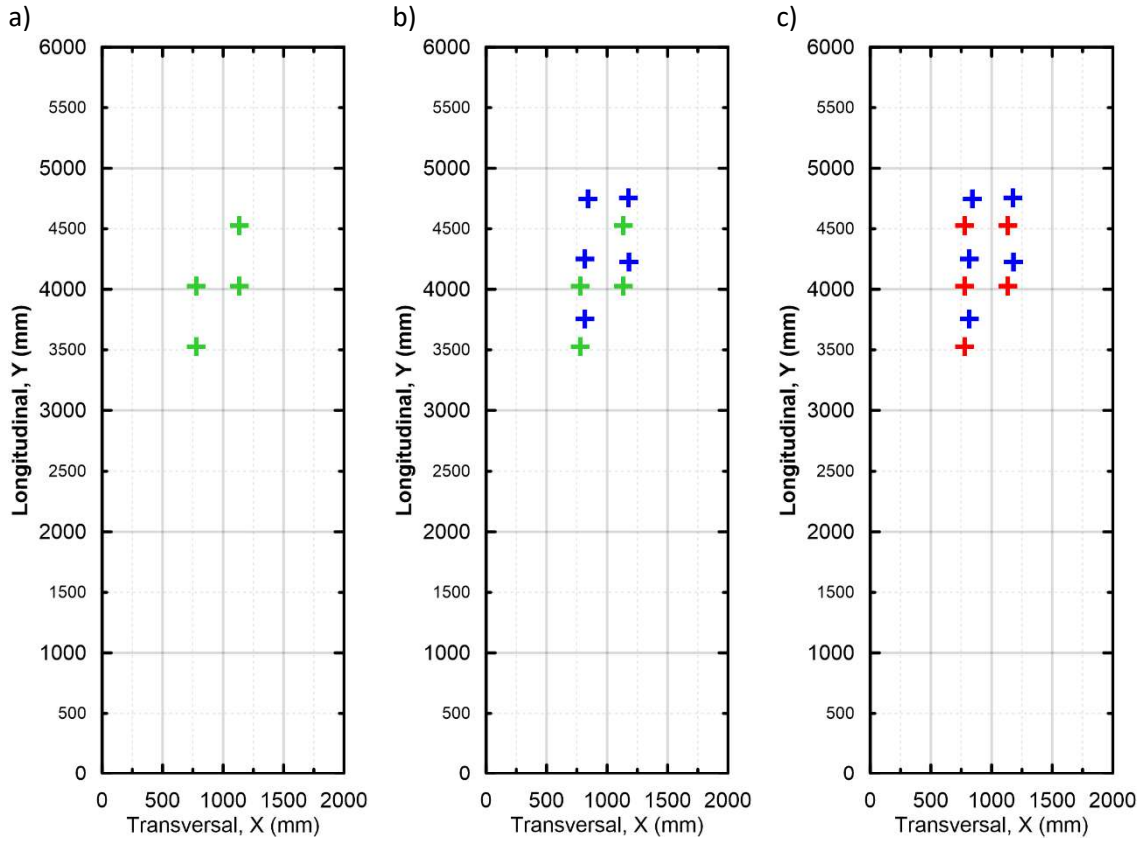


Figure 76. Position des TML sur chaque horizon, a) à la base du GB20 (vert), b) sommet de la couche de GB20 (bleu), c) base de la couche de ESG10 (rouge)



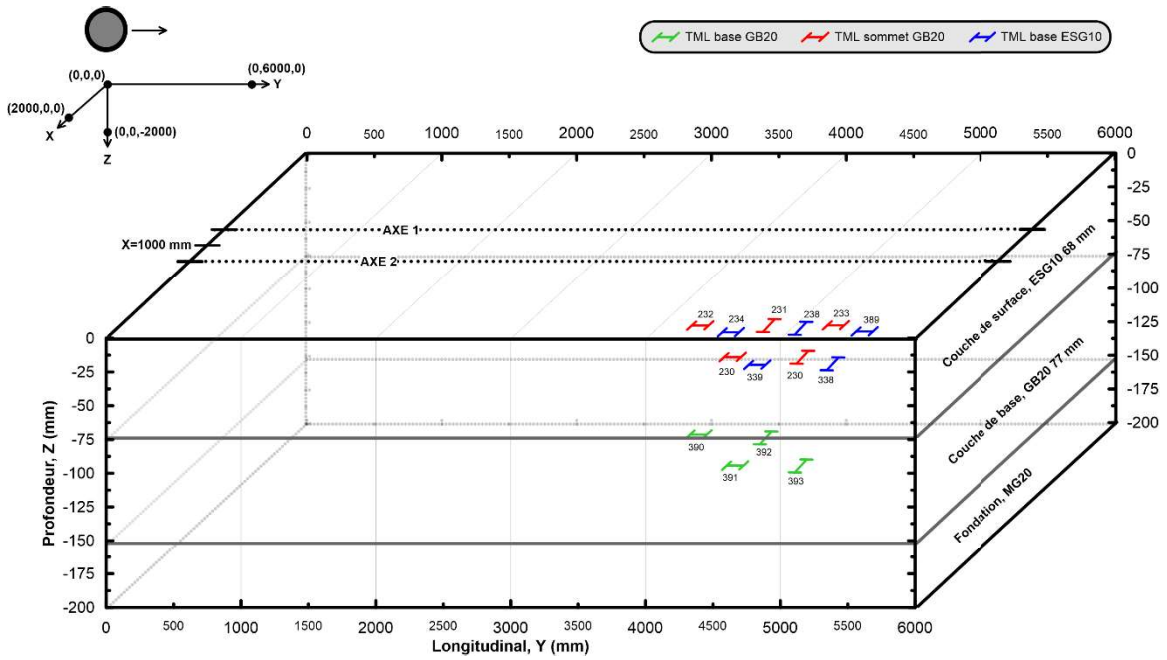


Figure 77. Positionnement 3D des jauges TML dans les couches d'enrobé bitumineux

## 10 État des instruments

L'état de fonctionnement des instruments a été vérifié pendant et suite à la construction. Au moment d'écrire ce rapport, un seul capteur semble endommager et inutilisable. Il s'agit de la thermistance 5, implantée dans la partie supérieure de la couche de sous-fondation.

## 11 Essais sur la fosse

### 11.1 Essais au déflectomètre à masse tombante (FWD)

Suite à la construction et l'instrumentation de la fosse, des essais au déflectomètre à masse tombante (FWD) ont été effectués afin d'obtenir une première quantification de la réponse de la structure de chaussée lorsque soumise à des charges. Les essais ont été réalisés avant le positionnement du simulateur au-dessus de la fosse. Trois points de mesure ont été faits, tous en  $X = 1000$  mm, à des positions longitudinales de  $Y = 2000, 3000$  et  $4000$  mm. Des niveaux de charge de 27, 40, 53 et 71 kN ont été appliqués. La Figure 78 présente l'appareil FWD utilisé, un PRIMA2100, positionné au-dessus de la fosse. Lors des essais, la température dans le pavage a été mesurée comme étant égale à  $18,5$  °C. Une correction a été effectuée pour le niveau de charge.



Figure 78. Appareil FWD positionné au-dessus de la fosse en  $X=1000$  mm et  $Y=2000$  mm

Il doit être précisé que l'appareil de l'Université Laval a été calibré pour ce projet en utilisant l'appareil du Ministère des Transports, récemment entretenu et calibré. Des essais comparatifs ont été effectués sur une dalle de béton intérieure. Trois points de mesures ont été effectués, et les essais ont été répétés trois fois pour chaque point de mesure. L'analyse des résultats a mené à la conclusion qu'une dérive existe dans les lectures de la cellule de charge sur l'appareil de l'Université Laval. Cette conclusion a été établie puisque le ratio des lectures entre les géophones pour une même charge et une même distance était toujours semblable. Ceci porte à croire que le biais est donc au niveau de la cellule de charge. Un facteur de multiplication de 0,86 doit être appliqué aux lectures des géophones de l'appareil de l'Université Laval afin d'obtenir un bassin de déflexion similaire à celui de l'appareil du Ministère.

Les résultats des essais corrigés pour l'appareil sont introduits à la Figure 79 et au Tableau 18. Il est possible de constater que les bassins sont généralement répétables en progressant longitudinalement. La variabilité des résultats, exprimée en termes de coefficient de variation, est inférieure à 5% dans tous les cas, et égale à 2,6% en moyenne pour toutes les positions et charges confondues. Une légère augmentation des déflexions est tout de même notée en progression longitudinale (Y croissant). Elle peut être notamment attribuée au fait que la densité de la couche de surface tend à être moins grande en progressant de Y=2000 mm à Y=4000 mm (Figure 51), conduisant potentiellement à une moins grande rigidité. Il n'est pas possible de tracer des observations similaires pour les couches de sol ou de matériaux granulaires (Tableau 6).

Tableau 18. Résultats des essais de déflexion

Distance (mm)	Moyenne (microns)				Coef. Variation (%)			
	27 kN	40kN	53 kN	71 kN	27 kN	40 kN	53 kN	71 kN
0	243	358	483	647	4.8	3.9	3.3	4.8
200	191	281	377	504	4.0	2.9	2.0	4.0
300	154	228	306	410	2.7	2.0	1.0	3.1
450	113	168	226	303	2.1	1.4	0.9	2.2
600	80	121	164	221	1.1	1.7	1.5	1.3
900	46	70	96	129	2.1	2.1	2.4	1.5
1200	31	47	64	87	1.0	1.1	1.7	0.7
1500	25	38	52	70	3.5	3.5	3.4	3.0
1800	22	34	46	62	4.1	4.0	4.1	3.7

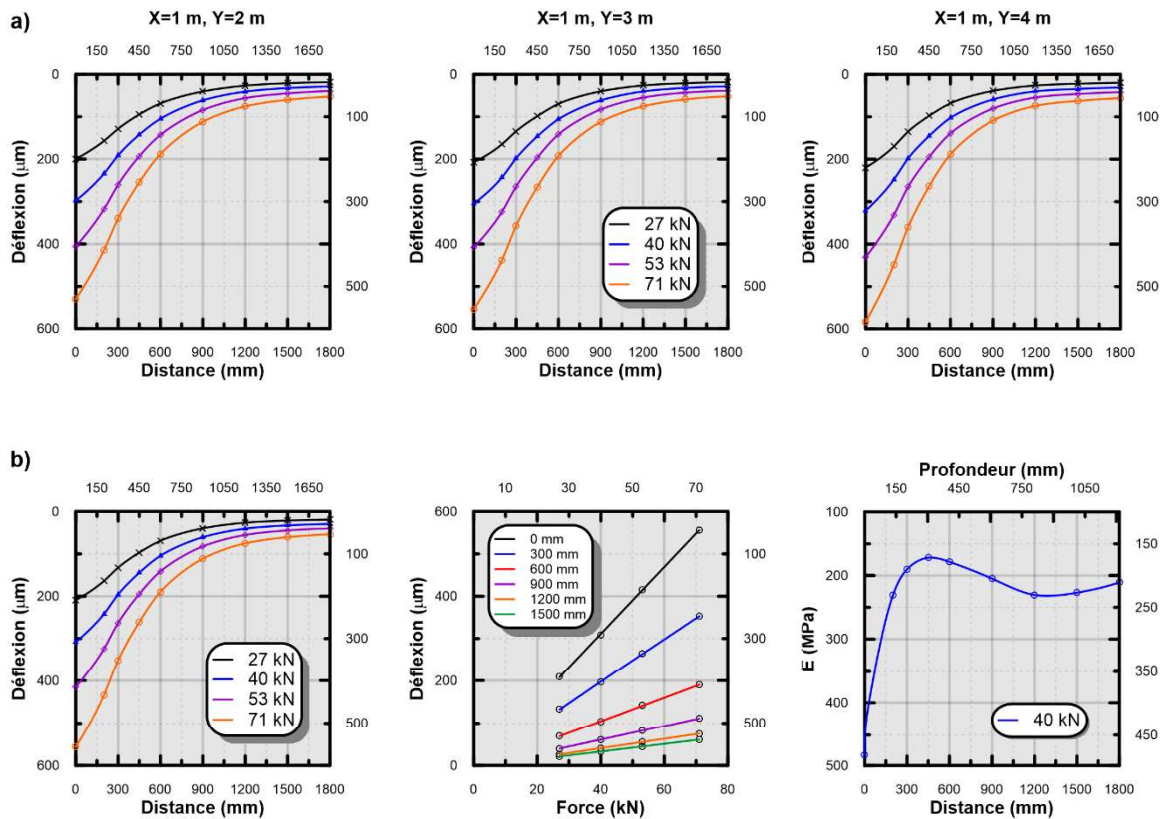


Figure 79. Résultats des essais FWD, a) Bassins de déflexion moyens pour les quatre niveaux de charge et les trois emplacements longitudinaux, b) Bassin de déflexion moyen, relation déflexion-force et modules de surface

Pour le chargement de 40 kN, le Tableau 19 présente quelques indices et paramètres pouvant être tirés du bassin de déflexion moyen. Notamment, en utilisant la méthode de Rohde (1994), il est possible de déterminer le nombre structural de la chaussée ainsi que le module du sol d'infrastructure, respectivement de 5,4 et 137 MPa. Notamment, la grande rigidité du sol d'infrastructure SM utilisé est en accord avec d'autres travaux de la Chaire i3C (Badiane et al., 2016). Les valeurs de rigidité du sol et du nombre structural montrent une bonne capacité structurale et sont supportées par les autres indices de courbure et de déflexion, car ceux-ci tendent également à montrer que la structure de chaussée est globalement forte et compétente, pour les conditions lors de la réalisation des essais.

Tableau 19. Interprétation du bassin de déflexion moyen à 40 kN

Paramètre	Valeur	Note
$E_{\text{infra}}$ (MPa)	137	Approche de Rohde (1994)
SN	5,4	Approche de Rohde (1994)
SCI (microns)	112	Rigide (Grenier 2006)
BDI (microns)	92	Moyen (Grenier 2006)
BCI (microns)	8	Très Bon (Michalak & Scullion 1995)
$d_{1500}$ (microns)	33	Rigide (Grenier 2006)

## 11.2 Essais AMAC

L'essai AMAC est utilisé pour mesurer l'adhésion entre les couches d'enrobé. Il a été réalisé selon la norme LC25-010 à deux endroits sur le bi-couche mis en œuvre dans le cadre de ce projet. Afin d'exécuter l'essai AMAC, la foreuse du Ministère des Transports du Québec a été utilisée (Figure 80). Cette remorque est équipée d'un mat amovible sur lequel est monté une carotteuse. Pour réaliser l'essai, un carottier de 75 mm a été utilisé. Le carottage est effectué jusqu'à une profondeur suffisante permettant de traverser l'interface de collage entre les deux couches d'enrobé bitumineux. Dans le cas de ce projet, le carottage a été effectué jusqu'à une profondeur de 85 mm. Selon le Tableau 2, cette profondeur serait environ de 15 à 18 mm sous l'interface.



Figure 80. Foreuse du Ministère des Transports du Québec

Tel que montré à la Figure 81, l'essai AMAC consiste en l'insertion d'un anneau de serrage dans le trait de carottage, suivi d'une traction verticale en utilisant un dispositif hydraulique. Une cellule de charge permet de mesurer la traction tout au long de l'essai. Le serrage entre l'anneau et la couche de surface en enrobé bitumineux est constamment réajusté lors de l'essai afin d'éviter le glissement de l'anneau sur les parois de l'enrobé dans le trait de carottage. Le suivi de la force verticale conduit typiquement en la mesure d'une contrainte maximale, suivi d'une chute significative, ce qui est associé à la rupture de l'interface. La réalisation de l'essai de traction prend environ une minute. Le résultat de l'essai AMAC est la contrainte maximale mesurée lors de l'essai. La Figure 82 présente le résultat du décollement des couches d'enrobé bitumineux. Il est possible d'y observer une cassure très nette sur l'interface, résultat typique lors de la réalisation de cet essai.

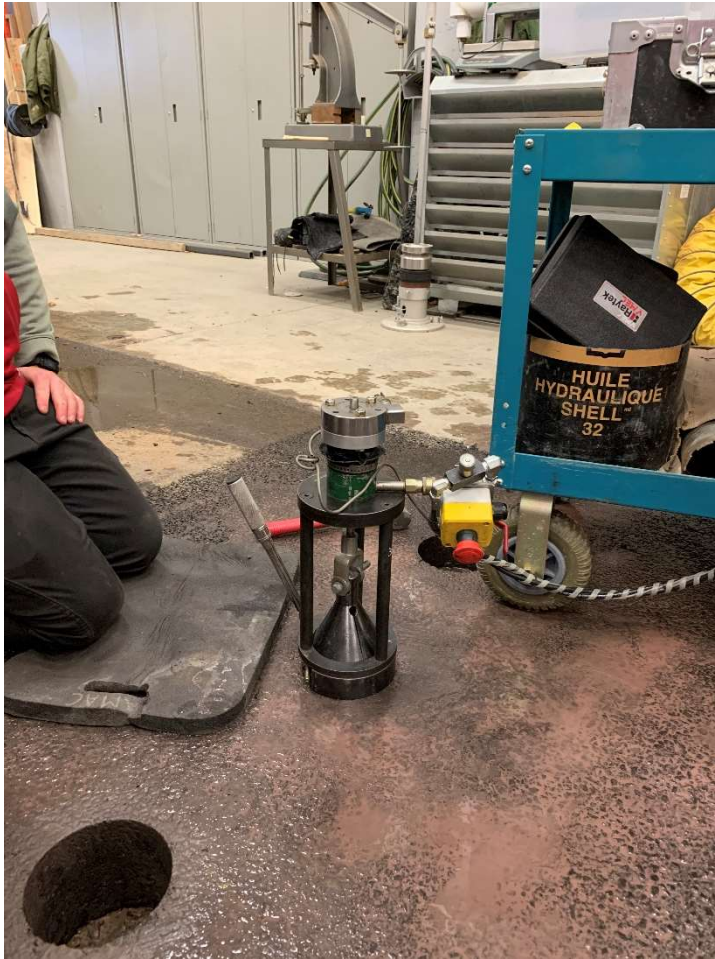


Figure 81. Équipement de l'essai AMAC





Figure 82. Résultat du décollement du bi-couche obtenu lors de la réalisation de l'essai AMAC

Deux essais AMAC ont été réalisés sur la fosse d'essai. Les résultats sont présentés au Tableau 20. Des valeurs de 546 et 378 kPa ont été obtenues (moyenne de 462 kPa). Étant donné la température de l'interface ( $T_{\text{interf.}}$ ), la correction de température mentionnée dans la norme est négligeable. Le Ministère considère l'adhésion adéquate si la valeur de traction maximale corrigée est supérieure à 200 kPa, et les couches sont considérées parfaitement liées pour une valeur supérieure à 400 kPa. Étant donné les valeurs obtenues lors des essais, il a été choisi de s'en tenir à seulement deux points de mesures. L'adhésion entre les deux couches d'enrobé est jugée comme étant très satisfaisante pour les besoins du projet.

Le journal des essais est présenté à l'annexe J.

Tableau 20. Résultats des essais AMAC

	T <sub>air</sub> (°C)	T <sub>surf.</sub> (°C)	T <sub>interf.</sub> (°C)	X (mm)	Y (mm)	σ <sub>max</sub> (kPa)
Point 1	16,2	15,4	16,6	1070	6600	546
Point 2	16,5	15,3	16,3	490	1050	378

## 12 Protocole d'essais

Le protocole d'essais pour la réalisation du projet a été discuté et redéfini en 2019-2020. Le Tableau 21 présente un résumé de l'approche retenue. Des détails sur la température de la surface ( $T_{surf}$ ), de l'interface ( $T_{interf}$ ), sur la charge axiale sur le demi-essieu ( $Q$ ), sur la pression des pneus ( $P$ ) et sur les conditions de la surface, sont retrouvées. Il doit être noté qu'à ce stade de l'expérience, tous les moments où des charges seront appliquées, le nombre de répétitions sera limité, l'objectif étant de faire une caractérisation représentative de la réponse pour les conditions expérimentales lors d'une phase considérée. De plus, lors des phases de cycles thermiques impliquant des chargements, les chargements seront appliqués régulièrement (autant que possible) durant la progression des températures.

Le protocole proposé est divisé en 30 phases (P). De façon générale, l'étude se décompose en sept megaphase (MP) :

- A. Préparation et conditionnement;
- B. Cycles thermiques initiaux sans chargement;
- C. Réponse initiale à 20 °C;
- D. Réponse initiale à 5 °C;
- E. Réponse initiale à -10°C;
- F. Saturation partielle du ESG10;
- G. Cycles de gel et dégel partiellement saturé;

Tableau 21. Protocole pour les essais

MP	P	Nom	T <sub>surf</sub> (°C)	T <sub>interf.</sub> (°C)	Q (kN)	p (kPa)	Cond. surface
<b>A</b>	<b>1</b>	Préparation	amb.		0		sèche
	<b>2</b>	Initiation	libre	20	0		sèche
	<b>3</b>	Profils initiaux	libre	20	0		sèche
<b>B</b>	<b>4</b>	Transitions 20 °C à 5 °C	libre	5	0		sèche
	<b>5</b>	Cycles thermiques (x5)	libre	5 à -10	0		sèche
	<b>6</b>	Transition 5 °C -20 °C	libre	20	0		sèche
<b>C</b>	<b>7</b>	Réponse initiale (20 °C)	libre	20	40	560	sèche
	<b>8</b>	Réponse initiale (20 °C)	libre	20	50	700	sèche
	<b>9</b>	Réponse initiale (20 °C)	libre	20	65	800	sèche
	<b>10</b>	Repos pour transition	libre	20	0		sèche
<b>D</b>	<b>11</b>	Transition 20 °C - 5 °C	libre	5	0		sèche
	<b>12</b>	Profils	libre	5	0		sèche
	<b>13</b>	Réponse initiale (5 °C)	libre	5	40	560	sèche
	<b>14</b>	Réponse initiale (5 °C)	libre	5	50	700	sèche
	<b>15</b>	Réponse initiale (5 °C)	libre	5	65	800	sèche
<b>E</b>	<b>16</b>	Transition 5 °C -10 °C	libre	-10	0		sèche
	<b>17</b>	Profils	libre	-10	0		sèche
	<b>18</b>	Réponse initiale (-10 °C)	libre	-10	40	560	sèche
	<b>19</b>	Réponse initiale (-10 °C)	libre	-10	50	700	sèche
	<b>20</b>	Réponse initiale (-10 °C)	libre	-10	65	800	sèche
	<b>21</b>	Retour à 5 °C	libre	5	0		sèche
	<b>22</b>	Profils avant mouillage	libre	5	0		sèche
<b>F</b>	<b>23</b>	Mouillage	libre	5	0		Mouillée
<b>G</b>	<b>24</b>	Descente gel humide	libre	-10	50	700	Mouillée
	<b>25</b>	Profils après gel	libre	-10	0		
	<b>26</b>	Dégel	libre	5	50	700	Mouillée
	<b>27</b>	Profils après dégel	libre	5	0		
	<b>28</b>	Mouillage	libre	5	0		Mouillée
	<b>29</b>	Cyclage gel-dégel - 50 kN	libre	5 à -10	50	700	Mouillée
	<b>30</b>	Cyclage gel-dégel - 65 kN	libre	5 à -10	65	800	Mouillée

Tel que discuté dans le premier rapport (Bilodeau & Doré, 2019), des essais sont effectués sur la chaussée dont la surface est sèche, et par la suite la couche d'enrobé de surface est exposée à l'eau afin d'en augmenter la saturation. La saturation sera effectuée en deux temps. Premièrement, un bassin d'eau sera créé sur la partie centrale de la fosse. La charge appliquée d'eau sera d'environ 25 à 50 mm. Durant cette phase d'exposition, l'évolution de la saturation sera suivie avec un appareil de mesure de la constante diélectrique fourni par l'Université Gustave Eiffel. Par la suite, des passages de roues à charge faible seront appliqués sur la surface

constamment humidifiée, afin de forcer et pomper l'eau à l'intérieur des pores du ESG10. Le niveau de saturation atteint sera mesuré avec l'appareil de constante diélectrique.

Par ailleurs, suite à la réalisation d'essais de réponse sur la chaussée en conditions de gel et dégel sur la chaussée sèche et humide, un essai d'endommagement accéléré sera effectué. Le protocole détaillé de cet essai n'a pas encore été défini.

Les essais doivent démarrer en mars 2020.

## 13 Conclusion

Un projet de collaboration entre l'UGE, l'Université Laval et le Ministère des Transports portant sur les effets des cycles de gel et dégel sur les systèmes bicouches d'enrobés bitumineux a été initié en 2018. Il fait suite aux travaux de thèse de Vu (2017) réalisés à l'UGE. Ce projet prévoit notamment la réalisation d'une phase expérimentale avec un simulateur climatique et de véhicules lourds qui permet d'appliquer des cycles de gel et dégel à l'enrobé, tout en effectuant des sollicitations de charge roulante. Une analyse approfondie des mesures expérimentales est confiée à un étudiant au postdoctorat rattaché à l'UGE.

Ce second rapport d'étape présente la problématique identifiée pour le projet, la revue de la littérature, les premiers essais de laboratoire effectués dans la phase préparatoire au projet en simulateur, la construction de la fosse expérimentale, l'instrumentation et le protocole d'essais défini par le comité de projet. Après la construction de la planche expérimentale à l'automne 2019, les essais intensifs doivent démarrer en mars 2020. Néanmoins, l'auscultation préliminaire de la chaussée et des instruments montre un retour très positif du processus de construction. Au moment d'écrire ce rapport, la première mégaphase du protocole a été entreprise, avec les premières simulations thermiques en conditions sèches. Le prochain livrable rassemblera le traitement de l'ensemble de l'information recueillie sur la chaussée expérimentale lorsqu'elle sera soumise plus intensivement aux combinaisons de sollicitations thermiques et mécaniques, et conditions sèche et partiellement saturées.

## 14 Références

- Alarm. (2010). Annual Local authority road maintenance survey. *Asphalt Industry Alliance, Publication Embargo*, 20.
- Badiane, M., El Youssoufy, A., Doré, G., & Bilodeau, J.-P. (2016). Effet des charges en période de restriction des charges. *Rapport Final GCT-2016-01, Ministère Des Transports Du Québec*, 101.
- Bilodeau, J.-P., & Doré, G. (2019). Durabilité des matériaux et des structures de chaussées sous l'effet du trafic et des conditions climatiques – Comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis des cycles de gel et dégel. *Rapport de Recherche Pour Le Compte Du Ministère Des Transports Du Québec*, 57.
- Ghosh, D., Turos, M., Hartman, Marcella, H., Milavitz, R., & Le, J. L. (2018). Pothole Prevention and Innovative Repair. *Final Report CTS #2016007, Minnesota Local Road Research Board, Minnesota Department of Transportation, St-Paul, Minnesota, April*, 129.
- Grenier, S. (2006). Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante. *Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada*.
- Hecht, F. (2012). *New development in freefem ++*. 20(3), 251–265.  
<https://doi.org/10.1515/jnum-2012-0013>
- Huet, C. (1963). Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. *Thèse de Docteur Ingénieur, Faculté Des Sciences de l'Université de Paris*.
- Jenks, C. W., Jencks, C. F., Harrigan, E. T., Adcock, M., Delaney, P. E., & Freer, H. (2011). *A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary*. National Academies Press.  
<https://doi.org/10.17226/14524>

- Komba, J., Maharaj, A., & Paige-Green, P. (2010). Potholes: Technical Guide to their Causes, Identification, and Repair. In *CSIR Built Environment, Stellenbosch, South Africa*. <https://doi.org/10.1080/17533170500406104>
- Lamothe, S., Perraton, D., & Benedetto, H. Di. (2017). Degradation of hot mix asphalt samples subjected to freeze-thaw cycles and partially saturated with water or brine. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 849–864. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1286442>
- Lamothe, S., Perraton, D., & Di Benedetto, H. (2015). Contraction and expansion of partially saturated hot mix asphalt samples exposed to freeze–thaw cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 277–299. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.990917>
- Mauduit, V., Mauduit, C., Vulcano-Greullet, N., Coulon, N., Hammoum, F., David, H., Kerzreho, J. P., Piau, J. M., & Chabot, A. (2013). Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel: Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussees*, 279, 47–63.
- Michalak, C. H., & Scullion, T. (1995). MODULUS 5.0: User's Manual. In *Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station Texas Research Report 1987–1*.
- Özgan, E., & Serin, S. (2013). Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.09.003>
- Pan, P., Wu, S., Hu, X., Wang, P., & Liu, Q. (2017). Effect of freezing-thawing and ageing on thermal characteristics and mechanical properties of conductive asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.135>

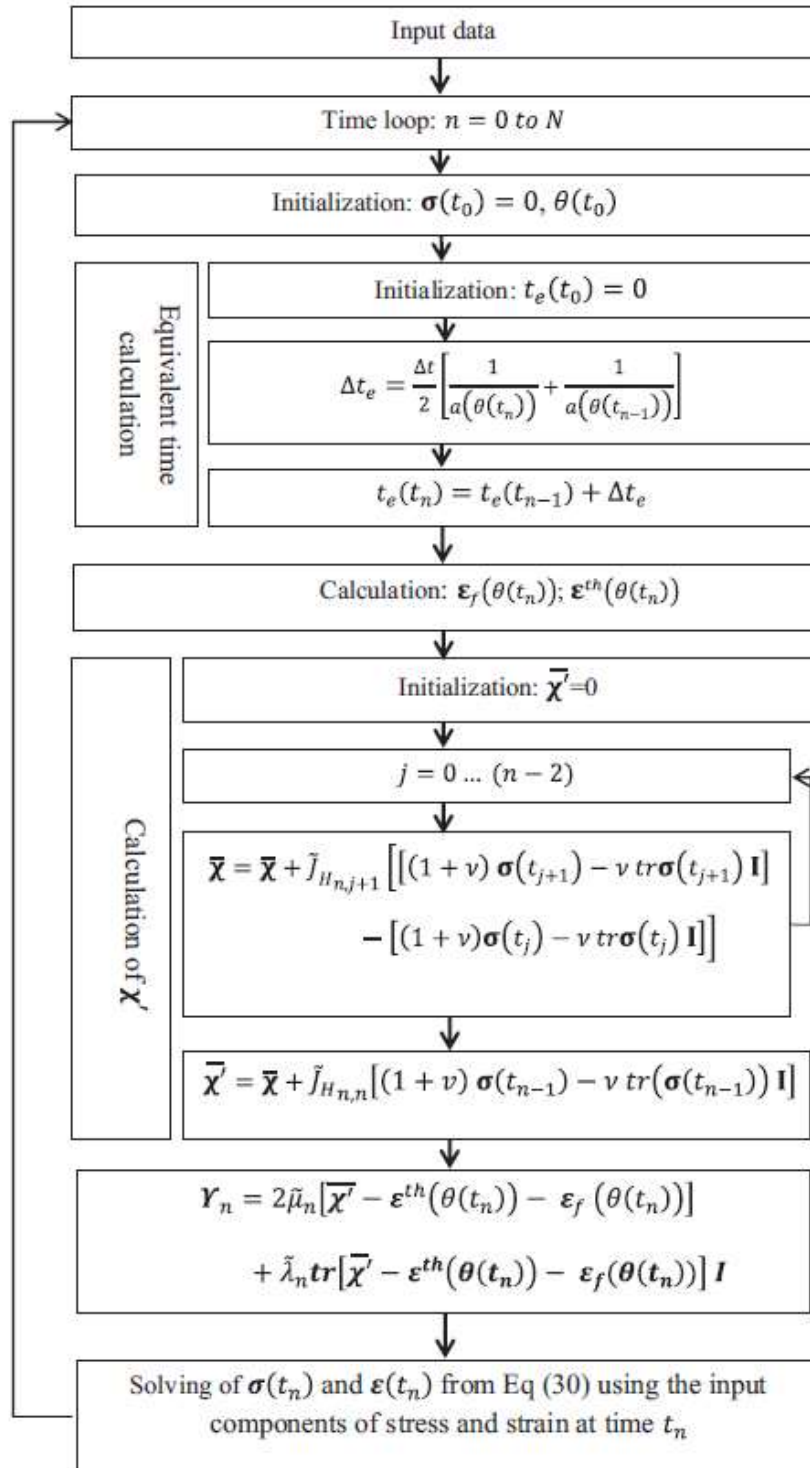


- Pandarias, D. (2010). Dégâts occasionnés au réseau routier national durant l'hiver 2009-2010. *Rapport Ministériel DIT-MARRN*, 56.
- Rohde, G. T. (1994). Determining pavement structural number from FWD testing. *TRB 73rd Annual Meeting, Preprint No.940351, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1448*, 61–68.
- Terrel, R. L., & Al-Swailmi, S. (1993). The Role of Pessimum Voids Concept in Understanding Moisture Damage to Asphalt Concrete Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1386, 31–37.
- Tremblay, M. (2006). Étude de la fréquence des événements météorologiques précurseurs des nids-de-poule: le Québec un cas particulier? Retrieved from [Http://Ptaff.ca/Routes\\_du\\_quebec/](http://Ptaff.ca/Routes_du_quebec/), Consulted December 2010.
- Vu, V. T. (2017). Etude expérimentale et numérique du comportement au gel et au dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés-Application à l'interprétation de dégradations subites de chaussées bitumineuses en période hivernale. *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes*.
- Vu, V. T., Chupin, O., Piau, J., & Hammoum, F. (2017). Étude expérimentale et numérique du comportement de l'enrobé bitumineux partiellement saturé en eau à température variable. *23ème Congrès Français de Mécanique*, 10.
- Vu, V. T., Chupin, O., Piau, J., & Hammoum, F. (2020). FE modelling of wet asphalt structures undergoing frost –Towards an explanation of winter potholes. *International Journal of Pavement Engineering, Manuscript submitted for publication*. <https://doi.org/10.1080/1478643YYxxxxxxx>
- Vu, V. T., Chupin, O., Piau, J., Hammoum, F., & Bouron, S. (2018). Experimental study and modeling of the behavior of partially saturated asphalt concrete under freezing condition. *Construction and Building Materials*, 163, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.070>

Xu, H., Guo, W., & Tan, Y. (2015). Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze–thaw cycles. *Materials & Design*, 86, 436–446.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.073>

## Annexe A

### Algorithme de calcul thermo-mécanique semi-couplé



## Annexe B

### Propriétés de l'émulsion



ATTESTATION DE CONFORMITÉ

Supercol H

Les Industries McAsphalt Inc.  
 USINE: St-Hyacinthe

N° de Client de livraison

INFORMATIONS GÉNÉRALES				EXPÉDITION		
Identification du fabricant et le lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Inc. - St-Hyacinthe				Nom du centre de test		
Identification du distributeur et le lieu de distribution Les Industries McAsphalt Inc. - St-Hyacinthe				Méthode d'essai		
Type de produit	Réserveur	Date fabrication	N° de lot	N° de la cliente	Date d'expédition	Quantité livrée
Supercol H	EC3-303	2019-09-25	LOT149928			
ESSAIS		RÉSULTATS	Spécifications		Méthode d'essai	
Date d'essai		2019-09-25	Min.	Max.		
Viscosité Saybolt Furol à 25°C (s)		40	20	100	AS M D7456	
Démulsification, 36 ml 0.8% C <sub>25</sub> H <sub>40</sub> NaO <sub>2</sub> S (%)		67.9	40.0	—	ASTM D6628	
Résidu de distillation à 250°C (%)		61.9	57.0	—	ASTM D3957	
Huile cu distillat (%)		0.0	—	3.0	ASTM D3957	
Chaleur à 64°C (JPa)		1.35	1.00	3.50	LC 25-012	
Type d'émulsion		Coltonique	CATIONIQUE		ASTM D241	
Notes: Lorsqu'il y a la température d'essai ou la température de la chaussée se situe entre 1 à 10°C, l'utilisation d'un réflecteur réglable, l'utilisation d'un réflecteur réglable en fonction de la température d'essai.				TEMPÉRATURE D'UTILISATION RECOMMANDÉE		
AUTORISATION				Entreposage		Minimale
Préparé par A. Lacroix		Approuvé par D. Voghe		Application		Maximale
2019-09-25		2019-09-25		Air ambiant		50°C 80°C 55°C 65°C 10°C
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS						
Nom de l'échantillon				Date d'échantillonnage		
Numéro du centre de location de l'échantillon						



LES INDUSTRIES McASPHALT Inc.  
 1935, 4<sup>e</sup> Étage Duplessis, Saint-Hyacinthe (Québec) J2R 1S5  
 Téléphone: 458 795 2502 Télécopieur: 458 795 4302

ISO 9001:2015, ISO 14001:2015  
 AASHTO 1118

## Annexe C

### Caractéristiques des enrobés et du bitume



## FORMULE DE MÉLANGE

### ENROBÉS BITUMINEUX

REGION SINTRA INC.	BML QC	SITE :	28 Usine d'enrob St-Jean Chrysostome 034
DATE	2019-04-03	TYPE de MÉLANGE :	GB-20
CODE de PRODUIT :	18248C110	No. de la FORMULE :	18R20GB2058H341A1
CODE INTERNE :	5803248C	TYPE de BITUME :	PG 58H-34

Remarque : Si l'enrobé tiède est utilisé, la technique sera par bitume moussé et le code interne sera 5803248Q. Les facteurs de corrections au four à ignition ont été réalisés à 480°C  
 Ancien no.formule: 3418GB205834R20 modifié en 2019, essai à l'ornière valide. Numéro de la source 3475-0028

		GRANULATS (% Passant)																		
CLASSE	ID	ORIGINE	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080	%	Dgb	Dga	%Abs			
0-10	GBR	28 Usine d'enrob St-Jean-Chry	100	100	100	97	75	57	45	34	22	12	6,8	20,0	2,680	2,710	0,00			
10-20	PC	28 Carrière St-Flavien (Ray-Car	100	93	50	13	3	2	2	2	1	1	1	47,2	2,857	2,952	1,14			
5-10	PC	28 Carrière St-Flavien (Ray-Car	100	100	100	91	8	4	3	2	2	2	1,1	9,5	2,865	2,973	1,28			
0-5	CPC	28 Carrière St-Flavien (Ray-Car	100	100	100	100	93	61	40	28	20	15	11	23,3	2,809	2,913	1,41			
COMBINÉ			100	97	76	57	39	27	20	14	10	7	4,5	100,0	2,809	2,893	0,99			
FORMULE			100	98	78	57	39	26	19	14	9	7	5,8							
EXIGENCES MINIMUM			100	95	67	52	35							3,0						
EXIGENCES MAXIMUM			100	100	90	75	50							8,0						

CARACTÉRISTIQUES de la FORMULE	
TOTAL GRANULOMÉTRIQUE	353
% de BITUME	4,35
% de VIDES	3,0
V.A.M.	12,9
PBI ENROBÉS LC	4,35
DENSITÉ EFFECTIVE	2,842
% de BITUME EFFECTIF	3,95
% V.A.M. COMBLÉ par le BITUME	76,7
TYPE de BITUME (PG) UTILISÉ en FORMULATION	PG 58-34
DENSITÉ du BITUME	1,020
SURFACE SPÉCIFIQUE TOTALE	4,80
FILM de BITUME	8,41
Facteur de correction, EXTRACTION, IGNITION	0,19   0,55
INDICE de COMPACTIBILITÉ	
STABILITÉ	
DÉFORMATION	
DENSITÉ BRUTE	2,559
DENSITÉ MAXIMALE	2,637
VBE du PBI ENROBÉS LC	10,2
ÉPAISSEUR MINIMUM de POSE (mm)	80,0
Taux de POSE MINIMAL (kg/m.c.)	197
TENUE à L'EAU	
ESSAI CPP	0,50
PBA	0,42
BITUME / TG	1,23

FORMULATION à la PCG			
NOMBRE de GIRATIONS	10	120	200
% de VIDES	16,1	6,2	4,7
EXIGENCES	≥11	4.0-7.0	≥2

ESSAI à l'ORNIÈREUR			
Nombre de cycles	1000	3000	30000
ORNIFRAGF en %			4,4
EXIGENCES MAX	-	-	≤10%

FORMULE avec ADDITIF		
ADDITIF UTILISÉ	GBR	BAR
% d'ADDITIF	20,0	
% DE BITUME de L'ADDITIF	3,85	

Présentée par :	Hugo Lacasse B.	Vérfiée par :	Hugo Lacasse B.
-----------------	-----------------	---------------	-----------------

Remarques : \_\_\_\_\_





Construction B.M.L.  
 Division de **sintra** Inc.

## FORMULE DE MÉLANGE

### ENROBÉS BITUMINEUX

REGION SINTRA INC.	BML QC
DATE	2019-05-13
CODE de PRODUIT :	18028C110
CODE INTERNF :	5803028C

SITE :	28 Usine d'enrob St-Jean Chrysostome 034
TYPE de MÉLANGE :	ESG-10
No. de la FORMULE :	18R0ESG1058H341A1
TYPE de BITUME :	PG 58H-34

Remarque : Si l'enrobé tiède est utilisé, la technique sera par bitume moussé et le code interne sera 5803028Q. Les facteurs de corrections au four à ignition ont été réalisés à 480°C.  
 Ancien no.formule: 3418ESG10R0 modifié en 2019, essai à l'ornière valide. No de la source 3475-0028 pierre de Ray-Car. No de la source sable naturel 3474-0154.

GRANULATS (% Passant)																	
CLASSE	ID	ORIGINE	28	20	14	10	5	2,5	1,25	0,630	0,315	0,160	0,080	%	Dgb	Dga	%Abs
0-5	SN	28 Banc Vachon St-Lambert	100	100	100	100	97	93	90	86	70	23	3	7,5	2,632	2,681	0,72
5-10	PC	28 Carrière St-Flavien (Ray-Car)	100	100	100	91	8	4	3	2	2	1,5	1,1	40,0	2,865	2,973	1,28
0-5	CPC	28 Carrière St-Flavien (Ray-Car)	100	100	100	100	93	61	40	28	20	15	11	52,5	2,809	2,913	1,41
COMBINE			100	100	100	96	59	41	29	22	17	10	6,5	100,0	2,817	2,918	1,31
FORMULE			100	100	100	97	60	41	29	22	16	9	7,5				
EXIGENCES MINIMUM			100	100	100	92	52							4,0			
EXIGENCES MAXIMUM			100	100	100	100	65							10,0			

CARACTÉRISTIQUES de la FORMULE	
TOTAL GRANULOMÉTRIQUE	482
% de BITUME	5,36
% de VIDES	2,6
V.A.M.	14,5
PBI ENROBÉS LC	5,36
DENSITÉ EFFECTIVE	2,867
% de BITUME EFFECTIF	4,76
% V.A.M. COMBLÉ par le BITUME	82,1
TYPE de BITUME (PG) UTILISÉ en FORMULATION	PG 58-34
DENSITÉ du BITUME	1,020
SURFACE SPÉCIFIQUE TOTALE	6,66
FILM de BITUME	7,38
Facteur de correction, EXTRACTION, IGNITION	0,21   0,40
INDICE de COMPACTIBILITÉ	
STABILITÉ	
DÉFORMATION	
DENSITÉ BRUTE	2,546
DENSITÉ MAXIMALE	2,613
VBE du PBI ENROBÉS LC	12,2
ÉPAISSEUR MINIMUM de POSE (mm)	40,0
TAUX de POSE MINIMAL (kg/m.c.)	97
TENUE à L'EAU	
ESSAI CPP	0,50
PBA	0,63
BITUME / TG	1,11

FORMULATION à la PCG			
NOMBRE de GIRATIONS	10	80	200
% de VIDES	14,0	5,6	3,4
EXIGENCES	≥11	4,0-7,0	≥2

ESSAI à l'ORNIÈREUR			
Nombre de cycles	1000	3000	30000
ORNIFRAGF en %	4,3	6	
EXIGENCES MAX	≤10%	≤15%	-

FORMULE avec ADDITIF		
ADDITIF UTILISÉ	GBR	BAR
% d'ADDITIF		
% DE BITUME de L'ADDITIF		

Présentée par: Thomas Ruel	Vérfiée par: Hugo Lacasse B.
----------------------------	------------------------------

Remarques : \_\_\_\_\_



ATTESTATION DE CONFORMITÉ  
 BITUMES

PG 58H-34

Les Industries McAsphalt Itée  
 USINE: Bécancour

N° de billet de lycanon  
 250-2019 2536

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX		RECOMMANDATION DES TEMPÉRATURES D'UTILISATION		
Nom du fabricant et lieu de fabrication Les Industries McAsphalt Itée Bécancour		Entreposage	Minimale	Maximale
Lieu d'entreposage et d'expédition Les Industries McAsphalt Itée Bécancour			140 °C	175 °C
Classe de performance PG 58H-34		Malaxage à chaud	156 °C	170 °C
Nom commercial PG 58H-34				
Numéro du lot LOT150488		Date de fabrication 2019-10-20		
RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION		RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONTRÔLE		
Date des essais de caractérisation 2019-10-21		Date des essais de contrôle 2019-10-21		
G*/sin δ (MPa) (bitume d'origine) 1.43		G*/sin δ (MPa) (bitume d'origine) 1.43		
Température élevée de la caractérisation (T <sub>e</sub> ) (°C) 58		Module de rigidité S <sub>160</sub> (MPa) 142		
Viscosité Brookfield à 135°C (Pa.s) 0.605		Pente m <sub>165</sub> 0.167		
Viscosité Brookfield à 165°C (Pa.s) 0.189		Complaisance non-recouvrable J <sub>nr,165</sub> (Pa <sup>-1</sup> ) 0.75		
Point d'écoulement (°C) 294		Compl. non-recouvrable diff. J <sub>nr,diff</sub> (%) 50.7		
Stabilité au stockage (°C)*** 0.6		Réponse élastique R <sub>1,2</sub> (%) 62.2		
IBA moyenne (°C)*** 56.8		EXPÉDITION		
Teneur en cendres (%) 0.03		Numéro et nom de la centrale d'expédage S.T. Jean-Chrysostome		
Masse volumique à 25°C (g/cm <sup>3</sup> ) 1.019		Transporteur Nesult		
Masse volumique à 15°C (g/cm <sup>3</sup> ) 1.025		N° de la notice 444-15		
Enrobage résiduel (%) 5/0		Date du chargement 2019-10-29		
Module de rigidité S <sub>160</sub> (MPa) 142		Quantité livrée 889 TC		
Perte m <sub>165</sub> (%) 0.467		NOTES		
Variation de masse au RTFOT (%) -0.870		D 311 2019 174 163°C		
Température de l'essai MSCR (°C) 58		250-2019 2536 5.7		
Corrélation non-recouvrable J <sub>nr,165</sub> (Pa <sup>-1</sup> ) 0.75		Tank #3 38.97%		
Compl. non-recouvrable diff. J <sub>nr,diff</sub> (%) 50.7				
Réponse élastique R <sub>1,2</sub> (%) 62.2				
Température basse de caractérisation (T <sub>b</sub> ) (°C) -34.2				
REMARQUES				
Ce bitume est conforme à PG 58-34 selon la norme MTQ 4101 2015-12-15.				
*** Résultat de stabilité au stockage du lot précédent LOT150366.				
Le résultat de ce lot est disponible sur demande.				
Préparé par A. Laroche		Date 2019-10-22		Approuvé par S. Menard
				Date 2019-10-22
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS				
N° du contrat		Soumis par (organisme de contrôle)		
Prélevé par		À l'usage du laboratoire		
N° du réservoir à la centrale d'enrobage		Température °C		Date de réception



LES INDUSTRIES McASPHALT Itée  
 7905, avenue Duplessis, Saint-Hyacinthe (Québec) J2R 1S5  
 Téléphone : 450 796-2691 Télécopieur 450 756-4302

www.mcasphalt.com  
 ISO 9001/14001, OHSAS 18001  
 AASHTO P18

## Annexe D

### Caractérisation du sol et des matériaux granulaires



BNQ 2501-025  
 BNQ 2560-040

### Analyse granulométrique

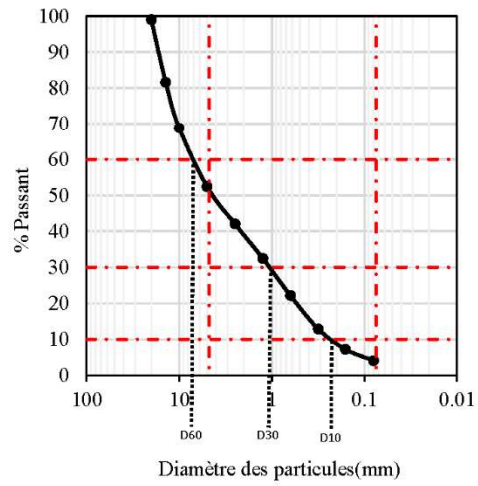
Projet: Simulateur	Forage No.
Client:	Localisation:
Provenance:	Prélevé par:
Nature de l'échantillon: MG20	Prélevé le:
Usage prévu: Terrain naturel	Matériau: <input type="checkbox"/> Densifié <input type="checkbox"/> Non-densifié

	gr	%	Module de finesse: <5mm: <10mm:		
Masse totale du sable:	6162.6	52.4	d <sub>10</sub> : 0.23	d <sub>30</sub> : 1.1	d <sub>60</sub> : 7.3
Masse total de la pierre:	5590.5	47.6	C.U.: 31.79	C.C.: 0.72	S.U.: -
Masse totale du sol:	11753.1	100.0			

Tamis B.N.Q.	Retenu (gr)	% Retenu Séparé	% Passant Combiné	Exigence B.N.Q.	Lavage	
112 mm	-	-	-	-	Masse initiale: (gr)	411
80 mm	-	-	-	-	Masse final: (gr)	379.9
56 mm	-	-	-	-	Passant 80 um: (gr)	31.9
40 mm	-	-	-	-	Teneur en eau	
31,5 mm	-	-	-	-		
20 mm	120.1	1.02	98.98	-	<input type="checkbox"/> Éch. Humide	<input type="checkbox"/> Naturelle
14 mm	2042.1	17.37	81.60	-	Sol hum. + tare (gr)	
10 mm	1507.8	12.83	68.77	-	Sol sec + tare (gr)	
5 mm	1920.5	16.34	52.43	-	Masse de l'eau (gr)	
Tamis B.N.Q.	Retenu Cumulatif (gr)	% Retenu Séparé	% Passant Combiné	Exigence B.N.Q.	Masse de la tare (gr)	
2,5 mm	81.4	19.81	42.05	-	Masse sol sec (gr)	
2,0 mm					Teneur en eau (%)	
1,25 mm	156.7	18.32	32.44	-	Conformité de l'essai	
630 um	237.3	19.61	22.16	-	Masse total avant essai (gr)	11798.4
315 um	310.5	17.81	12.82	-	Perte au tamisage >5mm. (%)	Max 2,0%
160 um	354.4	10.68	7.22	-		0.38
80 um	379	5.99	4.08	-	Perte au tamisage <5mm. (%)	Max 0,3%
PLAT	379.8	0.19	3.98	-		0.03

Remarque:	
Analysé par: Jesus David Cruz Sanchez /Maria F Baron	Date: 13/10/2019

### Courbe granulométrique





BNQ 2501-025  
 BNQ 2560-040

### Analyse granulométrique

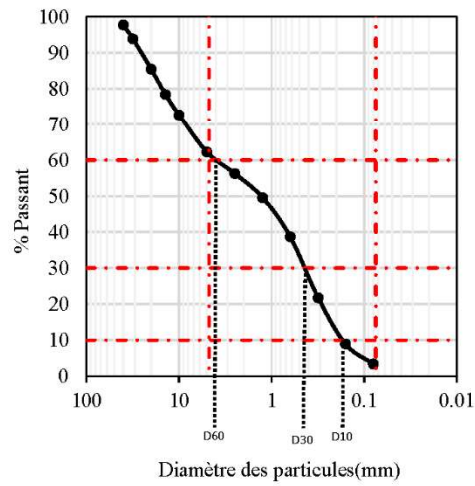
Projet: Simulateur	Forage No.
Client:	Localisation:
Provenance:	Prélevé par:
Nature de l'échantillon: MG112	Prélevé le:
Usage prévu: Terrain naturel	Matériau: <input type="checkbox"/> Densifié <input type="checkbox"/> Non-densifié

	gr	%	Module de finesse: <5mm: <10mm:		
Masse totale du sable:	19297	62.2	d <sub>10</sub> : 0.17	d <sub>30</sub> : 0.45	d <sub>60</sub> : 4.1
Masse total de la pierre:	11710.8	37.8	C.U.: 24.12	C.C.: 0.29	S.U.: -
Masse totale du sol:	31007.8	100.0			

Tamis B.N.Q.	Retenu (gr)	% Retenu Séparé	% Passant Combiné	Exigence B.N.Q.	Lavage	
112 mm	-	-	-	-	Masse initiale: (gr)	424.1
80 mm	-	-	-	-	Masse final: (gr)	403.0
56 mm	-	-	-	-	Passant 80 um: (gr)	21.1
40 mm	696.7	2.25	97.75	-	Teneur en eau	
31,5 mm	1198.6	3.87	93.89	-		
20 mm	2606.6	8.41	85.48	-	<input type="checkbox"/> Éch. Humide	<input type="checkbox"/> Naturelle
14 mm	2192.7	7.07	78.41	-	Sol hum. + tare (gr)	
10 mm	1781.1	5.74	72.67	-	Sol sec + tare (gr)	
5 mm	3235.1	10.43	62.23	-	Masse de l'eau (gr)	
Tamis B.N.Q.	Retenu Cumulatif (gr)	% Retenu Séparé	% Passant Combiné	Exigence B.N.Q.	Masse de la tare (gr)	
2,5 mm	40.5	9.55	56.29	-	Masse sol sec (gr)	
2,0 mm					Teneur en eau (%)	
1,25 mm	86	10.73	49.61	-	Conformité de l'essai	
630 um	160.4	17.54	38.70	-	Masse total avant essai (gr)	31493.86
315 um	275.6	27.16	21.79	-	Perte au tamisage	Max 2,0%
160 um	363.1	20.63	8.95	-	>5mm. (%)	1.54
80 um	401.4	9.03	3.33	-	Perte au tamisage	Max 0,3%
PLAT	401.98	0.14	3.25	-	<5mm. (%)	0.25

Remarque:	
Analysé par: Jesus David Cruz Sanchez /Maria F Baron	Date: 13/10/2019

### Courbe granulométrique

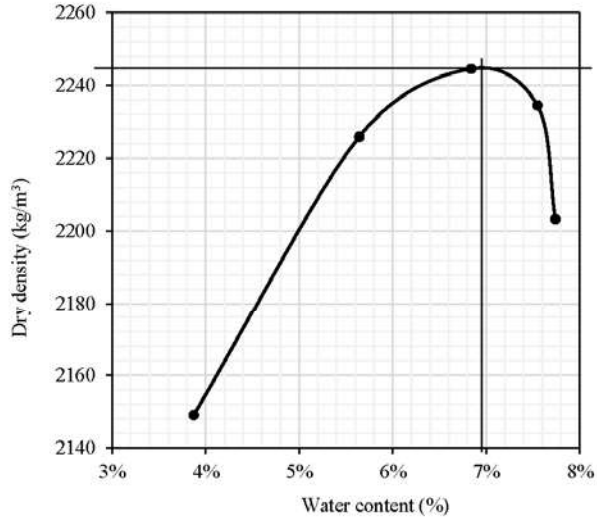




### Essai Proctor

Projet: Simulateur
Provenance:
Description: MG20
Méthode utilisée:
A <b>B</b> C    D

Proctor		
Normal		Modifié
25	Coups/couche	56
3	couches	5
2.49	kg-marteau	4.54
30.5	cm-chûte	45.7



% Humidité	4%	6%	8%	10%	14%	
Masse du moule + sol humide (g)	11160.6	11410.90	11510.40	11526.40	11459.90	
Masse du moule (g)	6482.1	6482.10	6484.00	6489.40	6484.40	
Masse du sol humide (g)	4678.5	4928.8	5026.4	5037.0	4975.5	
Volume du moule	2095.93cm <sup>3</sup>	2095.93	2095.93	2095.93	2095.93	
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	2.23	2.35	2.40	2.40	2.37	
Masse volumique humide (kg/m <sup>3</sup> )	2232.18	2351.61	2398.17	2403.23	2373.89	

Numéro de la tare	777.0	C-06	3	1	6	
Masse de la tare + sol humide (g)	5034.6	5180.60	7877.80	5743.00	6237.4	
Masse de la tare + sol sec (g)	4860.5	4917.8	7557.1	5388.3	5881.4	
Masse de la tare (g)	363.8	261.5	2869.2	689.3	1282.7	
Masse de l'eau net (g)	174.1	262.8	320.7	354.7	356.0	
Masse de sol sec (g)	4496.7	4656.3	4687.9	4699.0	4598.7	
Teneur en eau (%)	3.9%	5.6%	6.8%	7.5%	7.7%	
Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	2149.0	2226.0	2244.6	2234.6	2203.3	

Teneur en eau optimale:	6.90%	Analysé par Jesus David Cruz Sanchez
Masse volumique maximale sèche	2244.7(kg/m <sup>3</sup> )	Date: 13/10/2019





BNQ 2560-065

**DENSITÉ RELATIVE ET  
 ABSORPTION DU GRANULAT FIN**

Projet: SIMULATEUR	Forage No.:
Client: JEAN-PASCAL	Profondeur:
Provenance:	Prélevé par:
Nature de l'échantillon: MG20	Prélevé le:

Pycnomètre no: H	Masse du pycnomètre	189.2	g
------------------	---------------------	-------	---

A) Masse dans l'air de la prise d'essai séché à l'étuve (110°C)		456.2	g
B) Masse du pycnomètre rempli d'eau à 23,0°C ± 1,7°C		682.2	g
C) Masse du pycnomètre contenant l'échantillon et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge (sous le ménisque) à <u>23</u> °C		973.3	g
Masse du granulats fin «saturé et superficiellement sec» (500g ou _____ g )		460	g
Densité brute	$\frac{A}{B + 500,0 - C}$	2.70	
Densité brute (SSS)	$\frac{500}{B + 500,0 - C}$	2.72	
Densité apparente	$\frac{A}{B + A - C}$	2.76	
Absorption	$\frac{500,0 - A}{A} \times 100$	0.83	%

Remarque:	
Analysé par: Jesus Cruz	Date: 23-11-2019



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

BNQ 2560-067

**DENSITÉ RELATIVE ET  
 ABSORPTION DU GROS GRANULAT**

Projet: SIMULATEUR	Forage No.:
Client: JEAN - PASCAL	Profondeur:
Provenance:	Prélevé par:
Nature de l'échantillon: MG20	Prélevé le:

A) Masse de l'agrégat séché à l'étuve (110°C)		3556.3	g
B) Masse de l'agrégat saturé dans l'air		3586.8	g
C) Masse de l'agrégat pesé dans l'eau		2241.9	g
D) Température de l'eau (23,0 ± 1,7°C)		24	°C
1) Densité relative brute (Bulk)	$\frac{A}{B-C}$	2.64	
2) Densité relative brute (Bulk) de l'échantillon saturé mais sec en surface	$\frac{B}{B-C}$	2.67	
3) Densité relative apparent	$\frac{A}{A-C}$	2.71	
4) Absorption	$\frac{B-A}{A}$	0.86	%

Remarque:	
Analysé par: Jesus Cruz	Date: 16-01-2020



BNQ 2560-067

**DENSITÉ RELATIVE ET  
 ABSORPTION DU GROS GRANULAT**

Projet: SIMULATEUR	Forage No.:
Client: JEAN - PASCAL	Profondeur:
Provenance:	Prélevé par:
Nature de l'échantillon: MG112	Prélevé le:

A) Masse de l'agrégat séché à l'étuve (110°C)		6415.6	g
B) Masse de l'agrégat saturé dans l'air		6462.9	g
C) Masse de l'agrégat pesé dans l'eau		4027	g
D) Température de l'eau (23,0 ± 1,7°C)		24	°C
1) Densité relative brute (Bulk)	$\frac{A}{B-C}$	2.63	
2) Densité relative brute (Bulk) de l'échantillon saturé mais sec en surface	$\frac{B}{B-C}$	2.65	
3) Densité relative apparent	$\frac{A}{A-C}$	2.69	
4) Absorption	$\frac{B-A}{A}$	0.74	%

Remarque:	
Analysé par: Jesus Cruz	Date: 16-01-2020

## Annexe E

### Essais de nucléodensimètre sur le sol et les matériaux granulaires

Détermination du degré de compacité d'un sol ou d'un matériau  
 granulaire à l'aide d'un nucléodensimètre (LC 22-003)

Note : ce formulaire peut aussi s'appliquer dans le cas d'une masse volumique sèche maximale établie à l'aide d'une planche de référence. Dans ce cas, certains résultats provenant du V-2746 doivent être retranscrits dans le présent formulaire.

Information générale				
Dossier MTMD/ET-Entrepreneur		Dossier MTMD/ET-Laboratoire		Dossier du laboratoire
Entrepreneur	Surveillant-Organisme Jean-Pascal Bilodeau		Route Fosse	Municipalité Québec
Information spécifique				
Matériau granulaire (calibre) MG-20		Autre matériau		Usage
Nom et numéro de la source			Municipalité (source)	
Numéro de lot	Couche de <input type="checkbox"/> 150 derniers mm sous fondation	Épaisseur moyenne (mm)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Localisation du lot
Nucléodensimètre				
Marque Troxler	Modèle 3411-b		Numéro de série 9822	

**DONNÉES**

Méthode pour MVmax  Planche de référence  Proctor méthode A  Proctor méthode B  Proctor méthode C

Masse volumique maximale sèche (MV <sub>max</sub> ) Kg/m <sup>3</sup>	% retenu tamis 5 mm (P <sub>5</sub> ) <sup>1</sup>	Densité brute du gros granulat (D)
	% passant tamis 5 mm (100-P <sub>5</sub> =S <sub>5</sub> )	
Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre (MV <sub>0</sub> ) Formule 1	Kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau optimale (w <sub>opt</sub> ) %
Facteur de correction (pour le % de pierre) (F <sub>c</sub> ) Formule 2		Correction de la teneur en eau (facteur K, formulaire V-2335)
Valeurs référentielles (R) (Calibration in situ du nucléodensimètre)		Densité 0,5% Humidité 0,7%

**CHANTIER**

Date de l'essai (Année-Mois-Jour)	2019-10-31	2019-10-31	2019-10-31	2019-10-31
Numéro de l'échantillon (analyse granulométrique)	1	2	3	4
Voie, rampe ou autre	Fosse	Fosse	Fosse	Fosse
Chirage				
Distance de la bordure (m) <input type="checkbox"/> Gauche <input type="checkbox"/> Droite <input type="checkbox"/> CL				
Élévation				
Profondeur de l'essai (mm)	200	200	200	200
1 Masse volumique humide (MV <sub>humide</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2197	2212	2239	2218
2 Quantité d'eau du matériau (M <sub>eau</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	76	72	57	67
3 Masse volumique sèche (MV <sub>Séchée</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2121	2140	2181	2151
4 Teneur en eau (w <sub>essai</sub> ) (%)	3,6	3,4	2,6	3,1
% retenu tamis 5 mm du matériau ausséché (P <sub>5aussé</sub> )				
Masse volumique sèche maximale à atteindre (MV <sub>0</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> ) Formule 3				
Degré de compacité obtenu (% Compacité) Formule 4				
Degré de compacité minimal exigé	<input type="checkbox"/> 90,0% <input type="checkbox"/> 95,0% <input type="checkbox"/> 98,0% <input type="checkbox"/> 95% <input type="checkbox"/> 95% <input type="checkbox"/> 98% <input type="checkbox"/> 100% (Planche) <input checked="" type="checkbox"/> Autre% n/v			

**FORMULES**

1 Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre $MV_0 = \frac{MV_{humide} - (P_5 \times Pr \times D)}{(100 - P_5)} \times 100$	2 Facteur de correction (pour le % de pierre) $F_c = \frac{MV_{max} - MV_0}{Pr}$	3 Masse volumique sèche maximale à atteindre* $MV = (F_c \times P_{aussé}) - MV_0$ ou $MV = MV_{max}$	4 Degré de compacité obtenu* $\% \text{ Compacité} = \frac{MV_{Séchée}}{MV} \times 100$
---	---	---	--

- Pour l'essai avec énergie de compactage modifiée (Proctor) : donnée provenant du rapport d'essai ou de l'attestation de conformité (ne pas oublier de convertir le % passant en % retenu P<sub>5</sub>). Pour une planche de référence : donnée provenant du V-2746.
- Valeur provenant de l'appareil nucléodensimètre (mesure en chantier).
- Selon l'article 7.1 de la méthode LC 22-003  
 \*Si P chantier > 50% : MV = MV<sub>max</sub> \* Si P chantier - Pr > 5% : établir une nouvelle MV<sub>max</sub>

Formulaire préparé par			
Nom Francis Lemay	Signature	Organisme MTQ	Date (Année-Mois-Jour) 2019-11-01
Approuvé par			
Nom	Signature	Organisme	Date (Année-Mois-Jour)

Détermination du degré de compacité d'un sol ou d'un matériau  
 granulaire à l'aide d'un nucléodensimètre (LC 22-003)

Note : ce formulaire peut aussi s'appliquer dans le cas d'une masse volumique sèche maximale établie à l'aide d'une planche de référence. Dans ce cas, certains résultats provenant du V-2746 doivent être retranscrits dans le présent formulaire.

Dossier MTMDET-Entrepreneur		Dossier MTMDET-Laboratoire		Dossier du laboratoire	
Entrepreneur		Surveillant-Organisme		Route	
Jean-Pascal Bilodeau - U Laval		Jean-Pascal Bilodeau - U Laval		Fosse	
Municipalité		Municipalité		Municipalité	
Québec		Québec		Québec	
Matériau granulaire (calibre)			Autre matériau		
Usage			Usage		
Nom et numéro de la source			Municipalité (source)		
Numéro de lot		Couche de		Épaisseur moyenne (mm)	
<input type="checkbox"/> 150 derniers mm sous fondation				Superficie (m <sup>2</sup> )	
Localisation du lot		Localisation du lot		Localisation du lot	
Marque		Modèle		Numéro de série	
Troxler		3411-b		9822	

**DONNÉES**

Méthode pour M<sub>V</sub>max  Planche de référence  Proctor méthode A  Proctor méthode B  Proctor méthode C

Masse volumique maximale sèche (M <sub>V</sub> max) Kg/m <sup>3</sup>	% retenu tamis 5 mm (P <sub>5</sub> ) % passant tamis 5 mm (100-P <sub>5</sub> =S <sub>5</sub> )	Densité brute du gros granulat (D)
Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre (M <sub>V</sub> ) Formule 1	Kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau optimale (w <sub>opt</sub> ) %
Facteur de correction (pour le % de pierre) (F <sub>c</sub> ) Formule 2	Correction de la teneur en eau (facteur K, formulaire V-2335)	
Valeurs référentielles (R) (Calibration in situ du nucléodensimètre)	Densité 0,8%	Humidité 1,2%

**CHANTIER**

Date de l'essai (Année-Mois-Jour)	2019-10-21	2019-10-21	2019-10-21	2019-10-21
Numéro de l'échantillon (analyse granulométrique)	1	2	3	4
Voie, rampe ou autre	Fosse	Fosse	Fosse	Fosse
Chirage				
Distance de la bordure (m) <input type="checkbox"/> Gauche <input type="checkbox"/> Droite <input type="checkbox"/> CL				
Élévation				
Profondeur de l'essai (mm)	200	200	200	200
1 Masse volumique humide (M <sub>V</sub> H <sub>essai</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2226	2181	2168	2226
2 Quantité d'eau du matériau (M <sub>S</sub> essai) (Kg/m <sup>3</sup> )	130	112	104	115
3 Masse volumique sèche (M <sub>V</sub> S <sub>essai</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2096	2069	2065	2111
4 Teneur en eau (w <sub>essai</sub> ) (%)	6,2	5,4	5,0	5,4
% retenu tamis 5 mm du matériau essai (P <sub>essai</sub> )				
Masse volumique sèche maximale à atteindre (M <sub>V</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> ) Formule 3				
Degré de compacité obtenu (% Compacité) Formule 4				
Degré de compacité minimal exigé	<input type="checkbox"/> 90,0% <input type="checkbox"/> 95,0% <input type="checkbox"/> 98,0% <input type="checkbox"/> 95% <input type="checkbox"/> 98% <input type="checkbox"/> 100% (Planche) <input checked="" type="checkbox"/> Autre% n/v			

**FORMULES**

1 Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre M <sub>V</sub> = M <sub>V</sub> max - (β x Pr x D) x 100 (100-P <sub>5</sub> )	2 Facteur de correction (pour le % de pierre) F <sub>c</sub> = M <sub>V</sub> max - M <sub>V</sub> Pr	3 Masse volumique sèche maximale à atteindre* M <sub>V</sub> = (F <sub>c</sub> x P <sub>max</sub> ) - M <sub>V</sub> ou M <sub>V</sub> = M <sub>V</sub> max	4 Degré de compacité obtenu* % Compacité = M <sub>V</sub> essai / M <sub>V</sub> x 100
--	---	---	---

1. Pour l'essai avec énergie de compactage modifiée (Proctor), donnée provenant du rapport d'essai ou de l'attestation de conformité (ne pas oublier de convertir le % passant en % retenu P<sub>5</sub>). Pour une planche de référence, donnée provenant du V-2746.
2. Valeur provenant de l'appareil nucléodensimètre (mesure en chantier).
3. Selon l'article 7.1 de la méthode LC 22-003  
 \*Si P chantier > 50% : M<sub>V</sub> = M<sub>V</sub>max \*Si P chantier < 5% : établir une nouvelle M<sub>V</sub>max

<b>Formulaire préparé par</b>			
Nom	Signature	Organisme	Date (Année-Mois-Jour)
Guillaume Villeneuve		MTQ	2019-10-21
<b>Approuvé par</b>			
Nom	Signature	Organisme	Date (Année-Mois-Jour)

Détermination du degré de compacité d'un sol ou d'un matériau  
 granulaire à l'aide d'un nucléodensimètre (LC 22-003)

Note : ce formulaire peut aussi s'appliquer dans le cas d'une masse volumique sèche maximale établie à l'aide d'une planche de référence. Dans ce cas, certains résultats provenant du V-2746 doivent être retranscrits dans le présent formulaire.

Dossier MTMD/ET-Entrepreneur		Dossier MTMD/ET-Laboratoire		Dossier du laboratoire	
Entrepreneur		Surveillant-Organisme Jean-Pascal Bilodeau		Route Fosse	
Municipalité Québec		Municipalité (source)		Usage	
Matériau granulaire (calibre)		Autre matériau		Usage	
Nom et numéro de la source		Municipalité (source)		Localisation du lot	
Numéro de lot		Couche de <input type="checkbox"/> 150 derniers mm sous fondation		Épaisseur moyenne (mm)	
Superficie (m <sup>2</sup> )		Localisation du lot		Localisation du lot	
Marque Troloxler		Modèle 3411-b		Numéro de série 9822	

**DONNÉES**

Méthode pour MVmax  Planche de référence  Proctor méthode A  Proctor méthode B  Proctor méthode C

Masse volumique maximale sèche (MV <sub>max</sub> ) Kg/m <sup>3</sup>	% retenu tamis 5 mm (P <sub>5</sub> ) <sup>1</sup>	Densité brute du gros granulat (D)
	% passant tamis 5 mm (100-P <sub>5</sub> =S <sub>5</sub> )	
Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre (MV <sub>0</sub> ) Formule 1	Kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau optimale (w <sub>opt</sub> ) %
Facteur de correction (pour le % de pierre) (F <sub>c</sub> ) Formule 2		Correction de la teneur en eau (facteur K, formulaire V-2335)
Valeurs référentielles (R) (Calibration in situ du nucléodensimètre)		Humidité
		0,8%
		0,97%

**CHANTIER**

Date de l'essai (Année-Mois-Jour)	2019-10-25	2019-10-25	2019-10-25	2019-10-25
Numéro de l'échantillon (analyse granulométrique)	1	2	3	4
Voie, rampe ou autre	Fosse	Fosse	Fosse	Fosse
Chirage				
Distance de la bordure (m) <input type="checkbox"/> Gauche <input type="checkbox"/> Droite <input type="checkbox"/> CL				
Élévation				
Profondeur de l'essai (mm)	200	200	200	200
1 Masse volumique humide (MV <sub>humide</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2060	2163	2087	2045
2 Quantité d'eau du matériau (M <sub>eau</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	47	54	50	49
3 Masse volumique sèche (MV <sub>Séchée</sub> ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2022	2109	2037	1996
4 Teneur en eau (w <sub>essai</sub> ) (%)	2,3	2,6	2,5	2,4
% retenu tamis 5 mm du matériau ausséché (P <sub>5</sub> )				
Masse volumique sèche maximale à atteindre (MV) (Kg/m <sup>3</sup> ) Formule 3				
Degré de compacité obtenu (% Compacité) Formule 4				
Degré de compacité minimal exigé	<input type="checkbox"/> 90,0% <input type="checkbox"/> 95,0% <input type="checkbox"/> 98,0% <input type="checkbox"/> 95% <input type="checkbox"/> 95% <input type="checkbox"/> 98% <input type="checkbox"/> 100% (Planche) <input checked="" type="checkbox"/> Autre% n/v			

**FORMULES**

1 Masse volumique sèche corrigée à 0% de pierre $MV_0 = \frac{MV_{max} - (P_5 \times Pr \times D)}{100 - P_5} \times 100$	2 Facteur de correction (pour le % de pierre) $F_c = \frac{MV_{max} - MV_0}{Pr}$	3 Masse volumique sèche maximale à atteindre* $MV = (F_c \times P_{eau}) - MV_0$ ou $MV = MV_{max}$	4 Degré de compacité obtenu* $\% \text{ Compacité} = \frac{MV_{Séchée}}{MV} \times 100$
--	---	---	--

- Pour l'essai avec énergie de compactage modifiée (Proctor) : donnée provenant du rapport d'essai ou de l'attestation de conformité (ne pas oublier de convertir le % passant en % retenu P<sub>5</sub>). Pour une planche de référence : donnée provenant du V-2746.
- Valeur provenant de l'appareil nucléodensimètre (mesure en chantier).
- Selon l'article 7.1 de la méthode LC 22-003  
 \*Si P chantier > 50% : MV = MV<sub>max</sub> \* Si P chantier - Pr > 5% : établir une nouvelle MV<sub>max</sub>

<b>Formulaire préparé par</b>			
Nom Francis Lemay	Signature	Organisme MTQ	Date (Année-Mois-Jour) 2019-10-25
<b>Approuvé par</b>			
Nom	Signature	Organisme	Date (Année-Mois-Jour)

## Annexe F

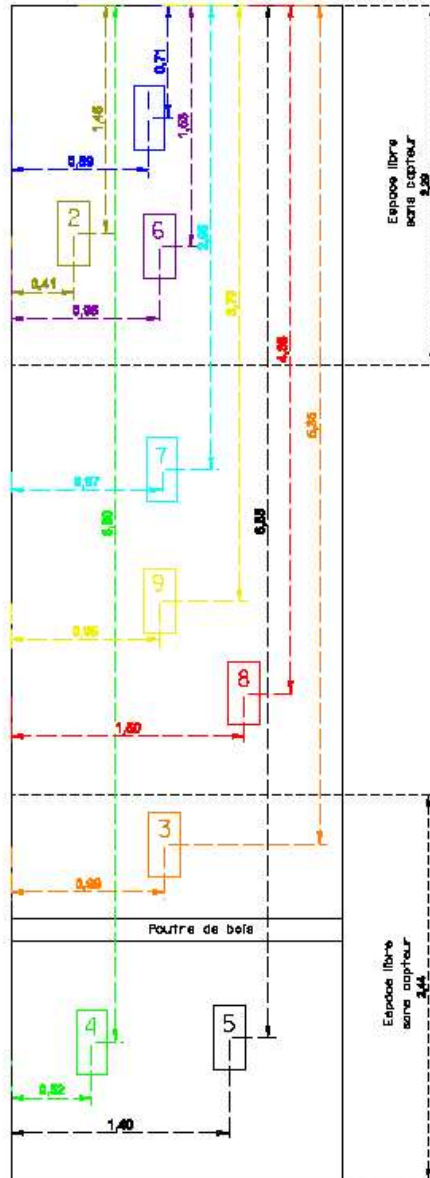
### Essais de nucléodensimètre sur les couches d'enrobé



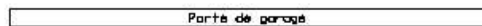
Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de base		
1	2291	2283	2259
	2321	2285	
2	2397	2361	2407
	2429	2378	
3	2498	2468	2535
	2470	2426	
4	2452	2318	2387
	2393	2422	
5	2433	2454	2425
	2458	2497	

Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de surface		
1	2404	2371	2408
	2386	2377	
2	2401	2397	2396
	2418	2389	
3	2360	2371	2382
	2363	2368	
4	2360	2375	2370
	2413	2385	
5	2269	2299	2307
	2318	2316	
6	2434	2455	2452
	2430	2421	
7	2329	2327	2321
	2320	2317	
8	2305	2288	2296
	2287	2295	
9	2261	2254	2256
	2260	2267	
10	2331	2333	2332
	2344	2347	

Note: L'emplacement \*10 n'a pas été mesuré donc inexistant sur le plan.



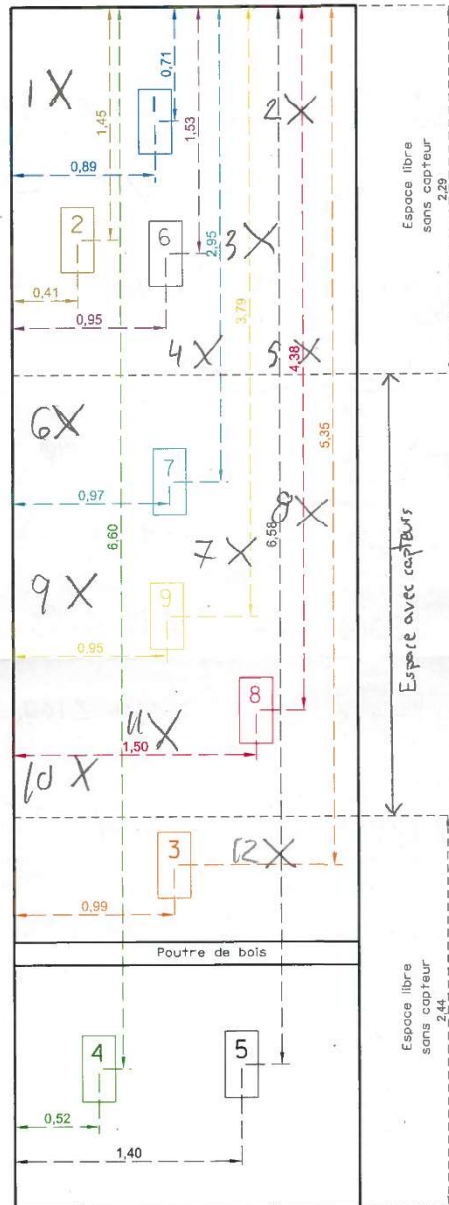
\* Toutes les mesures sont en mètres



Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de base		
	1	2291	2283
2321		2285	
2	2397	2361	2407
	2424	2378	
3	2498	2468	2536
	2470	2426	
4	2452	2318	2387
	2393	2422	
5	2433	2454	2425
	2458	2497	

Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de surface		
	1	2404	2371
2386		2377	
2	2401	2397	2396
	2418	2389	
3	2360	2371	2382
	2363	2368	
4	2360	2375	2370
	2413	2385	
5	2269	2299	2307
	2312	2316	
6	2434	2455	2452
	2430	2421	
7	2329	2327	2321
	2320	2317	
8	2305	2288	2296
	2287	2295	
9	2261	2254	2256
	2260	2267	
10	2331	2333	2332
	2344	2347	

Note: L'emplacement #10 n'a pas été mesuré donc inexistant sur le plan.



Porte de garage

## Annexe G

### Analyse en laboratoire des vides interstitiels des carottes recueillies sur la planche expérimentale

<b>Transports Québec</b> <small>Direction des matériaux d'infrastructure                  Secteur Enrobés</small>	DÉTERMINATION DU POURCENTAGE DE VIDES ET DE LA COMPACTITÉ DANS LES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS FS-34-S4-200	Page 1 de 1 Révision : 2 Date : 2018-06-12
--	--	--

**Feuille de travail de densité brute et du calcul des vides (enrobés denses)**

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
	S4-18-047	

		Numéros des échantillons		
		CR1 ESG-10	CR2 ESG-10	CR3 ESG-10
Masse sèche (g)	A	2836,2	2858,1	2632,9
Masse dans l'eau (g)	B	1672,3	1683,9	1550,6
Masse SSS (g)	C	2847,8	2882,4	2647,8
Température de l'eau (T°C) <<note 1>>		24,9	24,9	24,9
Facteur de correction <<note 2>>	D	1,000026	1,000026	1,000026
Densité brute	E	2,413	2,385	2,400
Densité maximale	F	2,600	2,600	2,600
% des vides réel	G	7,2	8,3	7,7
% de compacité		92,8	91,7	92,3
Moyenne de la compacité (%)		92,3		

Note 1 : l'essai doit être effectué à 25 ± 3°C

Note 2 : voir le tableau 1 à la page 7 de 8 de la méthode d'essai LC 26-040

Calcul de la densité brute (E) et du % des vides (G)

Notes

$$E = \left( \frac{A}{C - B} \right) * D$$

$$G = \left( 1 - \frac{E}{F} \right) * 100$$

La densité maximale de 2,600 a été fournie verbalement par l'entrepreneur suite à un contrôle interne la veille des travaux (2,613 sur la formule).

Equipements	
Balance : 3996	Thermomètres : 1788
Bains : 3475	Pompe (circulateur) : 2921

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r <= 0,035	C	NC
	X	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	X
Diviseur d'échantillon	X
Echantillons obtenues par sciage	X

Echantillons préparés par:	
Nombre de coups/face:	
Essai effectué par:	Jean-Simon St-Gelais
Date de l'essai:	2020-01-13

<b>Transports Québec</b> <small>Direction des matériaux d'infrastructure                  Secteur Enrobés</small>	DÉTERMINATION DU POURCENTAGE DE VIDES ET DE LA COMPACTITÉ DANS LES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS FS-34-S4-200	Page 1 de 1 Révision : 2 Date : 2018-06-12
--	--	--

**Feuille de travail de densité brute et du calcul des vides (enrobés denses)**

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
	S4-18-047	

		Numéros des échantillons		
		CR4 ESG-10		
Masse sèche (g)	A	2781,9		
Masse dans l'eau (g)	B	1626,8		
Masse SSS (g)	C	2794,0		
Température de l'eau (T°C) <<note 1>>		24,9		
Facteur de correction <<note 2>>	D	1,000026		
Densité brute	E	2,383		
Densité maximale	F	2,600		
% des vides réel	G	8,3		
% de compacité		91,7		
Moyenne de la compacité (%)			91,7	

Note 1 : l'essai doit être effectué à 25 ± 3°C

Note 2 : voir le tableau 1 à la page 7 de 8 de la méthode d'essai LC 26-040

Calcul de la densité brute (E) et du % des vides (G)

Notes

$$E = \left( \frac{A}{C - B} \right) * D$$

$$G = \left( 1 - \frac{E}{F} \right) * 100$$

La densité maximale de 2,600 a été fournie verbalement par l'entrepreneur suite à un contrôle interne la veille des travaux (2,613 sur la formule).

Equipements	
Balance : 3996	Thermomètres : 1788
Bains : 3475	Pompe (circulateur) : 2921

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r <= 0,035	C	NC
	X	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	X
Diviseur d'échantillon	X
Echantillons obtenues par sciage	X

Echantillons préparés par:	
Nombre de coups/face:	
Essai effectué par:	Jean-Simon St-Gelais
Date de l'essai:	2020-01-13

<b>Transports Québec</b> Direction des matériaux d'infrastructure Secteur Enrobés	DÉTERMINATION DU POURCENTAGE DE VIDES ET DE LA COMPACTITÉ DANS LES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS FS-34-S4-200	Page 1 de 1 Révision : 2 Date : 2018-06-12
---	--	--

**Feuille de travail de densité brute et du calcul des vides (enrobés denses)**

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
	S4-18-047	

		Numéros des échantillons		
		CR1 GB-20	CR2 GB-20	CR3 GB-20
Masse sèche (g)	A	2857,3	2326,0	3018,4
Masse dans l'eau (g)	B	1710,6	1373,9	1819,3
Masse SSS (g)	C	2884,1	2327,5	3031,4
Température de l'eau (T°C) <<note 1>>		24,9	24,9	24,9
Facteur de correction <<note 2>>	D	1,000026	1,000026	1,000026
Densité brute	E	2,435	2,439	2,490
Densité maximale	F	2,637	2,637	2,637
% des vides réel	G	7,7	7,5	5,6
% de compacité		92,3	92,5	94,4
Moyenne de la compacité (%)		93,1		

Note 1 : l'essai doit être effectué à 25 ± 3°C

Note 2 : voir le tableau 1 à la page 7 de 8 de la méthode d'essai LC 26-040

Calcul de la densité brute (E) et du % des vides (G)

Notes

$$E = \left( \frac{A}{C - B} \right) * D \quad G = \left( 1 - \frac{E}{F} \right) * 100$$


Équipements	
Balance : 3996	Thermomètres : 1786
Bains : 3475	Pompe (circulateur) : 2921

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r ≤ 0,035	C	NC
	X	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	
Echantillons obtenues par sciage	

Echantillons préparés par:	
Nombre de coups/face:	
Essai effectué par:	Jean-Simon St-Gelais
Date de l'essai:	2020-01-13

<b>Transports Québec</b> <small>Direction des matériaux d'infrastructure                  Secteur Enrobés</small>	DÉTERMINATION DU POURCENTAGE DE VIDES ET DE LA COMPACTITÉ DANS LES ENROBÉS À CHAUD COMPACTÉS FS-34-S4-200	Page 1 de 1 Révision : 2 Date : 2018-06-12
--	--	--

**Feuille de travail de densité brute et du calcul des vides (enrobés denses)**

Numéro de laboratoire	Numéro de projet	Numéro de contrat
	S4-18-047	

		Numéros des échantillons		
		CR4 GB-20		
Masse sèche (g)	A	2542,2		
Masse dans l'eau (g)	B	1545,1		
Masse SSS (g)	C	2563,5		
Température de l'eau (T°C) <<note 1>>		24,9		
Facteur de correction <<note 2>>	D	1,000026		
Densité brute	E	2,496		
Densité maximale	F	2,637		
% des vides réel	G	5,3		
% de compacité		94,7		
Moyenne de la compacité (%)			94,7	

Note 1 : l'essai doit être effectué à 25 ± 3°C

Note 2 : voir le tableau 1 à la page 7 de 8 de la méthode d'essai LC 26-040

Calcul de la densité brute (E) et du % des vides (G)

Notes

$$E = \left( \frac{A}{C - B} \right) * D \quad G = \left( 1 - \frac{E}{F} \right) * 100$$


Équipements	
Balance : 3996	Thermomètres : 1786
Bains : 3475	Pompe (circulateur) : 2921

Point de vérification (PV)		
Ecart maximal admissible répétabilité (r)		
r <= 0,035	C	NC
	X	

Réduction d'échantillon	
Inquartation	
Diviseur d'échantillon	
Echantillons obtenues par sciage	

Echantillons préparés par:	
Nombre de coups/face:	
Essai effectué par:	Jean-Simon St-Gelais
Date de l'essai:	2020-01-13

## Annexe H

### Calibration des chapelets de thermistances



Calibration chapelet de thermistances										
BARRETTE 1										
Référence	20 mm	$\Delta t$	50mm	$\Delta t$	80mm	$\Delta t$	110mm	$\Delta t$	140mm	$\Delta t$
10.06	9.9	-0.16	10	-0.06	9.9	-0.16	10	-0.06	9.9	-0.16
9.04	8.9	-0.14	9	-0.04	8.9	-0.14	9	-0.04	8.9	-0.14
8.02	7.9	-0.12	7.9	-0.12	7.9	-0.12	7.9	-0.12	7.9	-0.12
7.04	6.9	-0.14	7	-0.04	6.9	-0.14	7	-0.04	6.9	-0.14
6.03	5.9	-0.13	6	-0.03	5.9	-0.13	6	-0.03	5.9	-0.13
5	4.9	-0.1	4.9	-0.1	4.9	-0.1	5	0	4.9	-0.1
4.02	3.9	-0.12	4	-0.02	3.9	-0.12	4	-0.02	3.9	-0.12
3.02	3	-0.02	3	-0.02	2.9	-0.12	3	-0.02	2.9	-0.12
2.02	2	-0.02	2	-0.02	2	-0.02	2	-0.02	2	-0.02
1.01	1	-0.01	1	-0.01	1	-0.01	1	-0.01	1	-0.01
0.89	0.9	0.01	0.9	0.01	0.9	0.01	0.9	0.01	0.9	0.01
0.81	0.8	-0.01	0.8	-0.01	0.8	-0.01	0.8	-0.01	0.8	-0.01
0.71	0.7	-0.01	0.7	-0.01	0.7	-0.01	0.7	-0.01	0.7	-0.01
0.6	0.6	0	0.6	0	0.6	0	0.6	0	0.6	0
0.51	0.5	-0.01	0.5	-0.01	0.5	-0.01	0.5	-0.01	0.5	-0.01
0.39	0.4	0.01	0.4	0.01	0.4	0.01	0.4	0.01	0.4	0.01
0.31	0.3	-0.01	0.3	-0.01	0.3	-0.01	0.3	-0.01	0.3	-0.01
0.19	0.2	0.01	0.2	0.01	0.2	0.01	0.2	0.01	0.2	0.01
0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.08	-0.1	-0.02	-0.1	-0.02	-0.1	-0.02	-0.1	-0.02	-0.1	-0.02
-0.18	-0.2	-0.02	-0.2	-0.02	-0.2	-0.02	-0.2	-0.02	-0.2	-0.02
-0.26	-0.3	-0.04	-0.2	0.06	-0.3	-0.04	-0.3	-0.04	-0.3	-0.04
-0.38	-0.4	-0.02	-0.4	-0.02	-0.4	-0.02	-0.4	-0.02	-0.4	-0.02
-0.53	-0.5	0.03	-0.5	0.03	-0.5	0.03	-0.5	0.03	-0.5	0.03
-0.6	-0.6	0	-0.6	0	-0.6	0	-0.6	0	-0.6	0
-0.7	-0.7	0	-0.7	0	-0.7	0	-0.7	0	-0.7	0
-0.78	-0.8	-0.02	-0.8	-0.02	-0.8	-0.02	-0.8	-0.02	-0.8	-0.02
-0.95	-0.9	0.05	-0.9	0.05	-0.9	0.05	-0.9	0.05	-0.9	0.05
-1.01	-1	0.01	-1	0.01	-1	0.01	-1	0.01	-1	0.01
-1.98	-2	-0.02	-2	-0.02	-2	-0.02	-2	-0.02	-2	-0.02
-2.98	-3	-0.02	-3	-0.02	-3	-0.02	-3	-0.02	-3	-0.02
-4	-3.9	0.1	-4	0	-3.9	0.1	-4	0	-4	0
-4.96	-4.9	0.06	-5	-0.04	-4.9	0.06	-5	-0.04	-5	-0.04
-6.01	-5.9	0.11	-6	0.01	-5.9	0.11	-6	0.01	-6	0.01
-7	-6.9	0.1	-7	0	-6.9	0.1	-7	0	-7	0
-7.95	-7.9	0.05	-8	-0.05	-7.9	0.05	-8	-0.05	-8	-0.05
-9.03	-8.9	0.13	-9	0.03	-8.9	0.13	-9	0.03	-9	0.03
-9.99	-9.9	0.09	-10	-0.01	-9.9	0.09	-10	-0.01	-10	-0.01
Variation entre 10 et -10C										
$\Delta t$ MAX		0.13		0.06		0.13		0.05		0.05
$\Delta t$ MIN		-0.16		-0.12		-0.16		-0.12		-0.16
Variation entre 1 et -1 C										
$\Delta t$ MAX		0.05		0.06		0.05		0.05		0.05
$\Delta t$ MIN		-0.04		-0.02		-0.04		-0.04		-0.04



## Annexe I

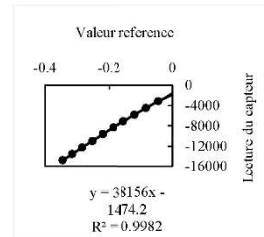
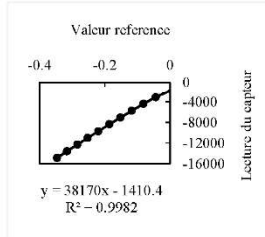
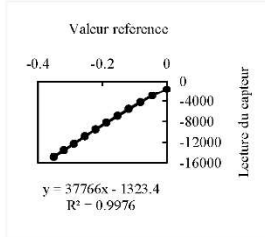
### Calibration des haltères de déformation verticale



CALIBRATION

A19-1

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)
0	0.0004	-1659.8332	0	0.0004	-1801.55497	0	0.0002	-1868.467641
24.223386	-0.0003	-1654.60879	10.104578	-0.0443	-3100.4935	7.376422	-0.0446	-3170.508269
45.303591	-0.0454	-2937.948929	16.191926	-0.0818	-4409.379536	13.087749	-0.0822	-4504.40374
57.17627	-0.0829	-4250.01391	20.864193	-0.1176	-5732.264708	19.488114	-0.1183	-5819.574792
63.735646	-0.1186	-5560.763993	26.656525	-0.152	-7040.687964	25.400453	-0.1532	-7138.461794
72.02412	-0.1532	-6893.725517	33.024889	-0.1862	-8356.958428	31.4718	-0.1872	-8454.686896
81.951688	-0.1884	-8222.202392	39.672269	-0.2202	-9726.066829	37.056119	-0.2201	-9767.5609
90.416172	-0.2217	-9545.900085	46.263646	-0.2529	-11015.53673	43.392482	-0.2522	-11060.83735
101.454803	-0.2551	-10885.94029	52.448	-0.2841	-12283.51157	48.720787	-0.2845	-12364.48121
134.887715	-0.2896	-12340.44815	58.848366	-0.3157	-13567.97459	53.952085	-0.3154	-13631.67808
146.375372	-0.3202	-13579.99341	66.047778	-0.3466	-14858.67188	58.816364	-0.3449	-14838.77251
158.984094	-0.3512	-14871.28706						



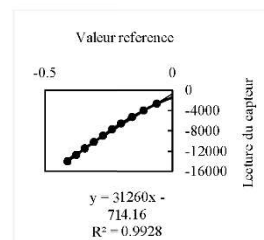
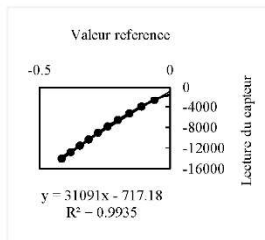
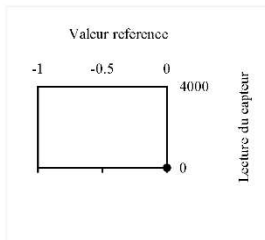
MOYENNE 38030.8



CALIBRATION

A19-2

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
#REF!	#REF!	#REF!	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)
#REF!	#REF!	#REF!	0	0.0012	-1338.84763	0	0.0008	-1391.656192
#REF!	#REF!	#REF!	3.784216	-0.0597	-2645.54685	5.94434	-0.0608	-2674.013149
#REF!	#REF!	#REF!	9.95957	-0.1094	-3945.333389	10.464599	-0.1112	-3994.995612
#REF!	#REF!	#REF!	15.303875	-0.1558	-5262.315237	15.064862	-0.1562	-5284.203029
#REF!	#REF!	#REF!	20.504173	-0.1997	-6550.107679	19.560119	-0.1998	-6569.002736
#REF!	#REF!	#REF!	26.088492	-0.239	-7796.649966	24.800418	-0.2388	-7811.886973
#REF!	#REF!	#REF!	30.895767	-0.276	-9056.0265	29.120666	-0.2752	-9082.94702
#REF!	#REF!	#REF!	36.592093	-0.3114	-10327.43485	34.343965	-0.3104	-10334.96974
#REF!	#REF!	#REF!	40.816335	-0.3458	-11543.36333	38.624209	-0.3449	-11582.95083
#REF!	#REF!	#REF!	46.584665	-0.3801	-12799.87649	43.840508	-0.379	-12839.29477
#REF!	#REF!	#REF!	53.880082	-0.415	-14062.92169	49.83285	-0.4121	-14053.23071



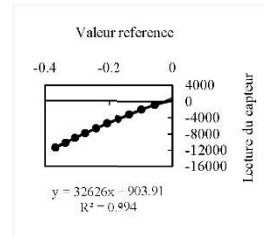
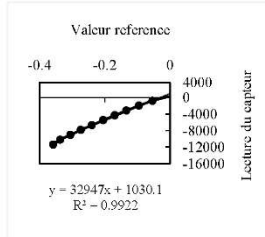
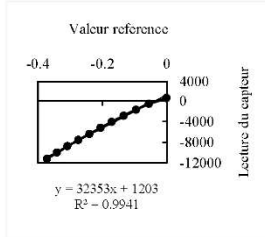
MOYENNE #REF!



CALIBRATION

A19-3

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)
0	-0.0011	517.594346	0	0.0004	356.631378	0	0.0003	269.090546
7.624436	-0.0558	-590.173683	9.200526	-0.0539	-747.955608	7.791446	-0.0548	-871.20508
13.479771	-0.0964	-1702.766251	16.463942	-0.0954	-1920.719595	14.047803	-0.0961	-2031.263203
22.416282	-0.1343	-2883.108242	23.392338	-0.1341	-3100.243408	19.551118	-0.1339	-3204.578888
31.743815	-0.1711	-4072.956228	29.19267	-0.1697	-4270.480381	26.479515	-0.171	-4409.800159
38.128181	-0.2061	-5234.275393	34.935998	-0.2047	-5454.557189	32.215843	-0.2063	-5573.35879
43.304477	-0.2407	-6409.038253	40.544319	-0.2394	-6639.015451	40.455314	-0.2412	-6782.789369
48.279761	-0.2749	-7591.576438	45.840622	-0.2737	-7835.888505	47.73573	-0.2747	-7954.638999
53.495059	-0.3087	-8792.977587	50.743903	-0.3056	-9012.278912	53.32005	-0.3071	-9111.235851
58.040319	-0.341	-10018.61149	56.096209	-0.3368	-10200.85635	58.91937	-0.3359	-10309.19158
62.864595	-0.3722	-11241.47761	61.53652	-0.3584	-11380.18182	65.087723	-0.3679	-11482.31442



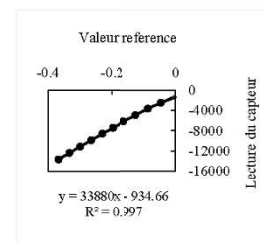
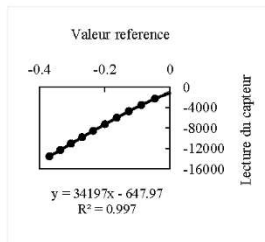
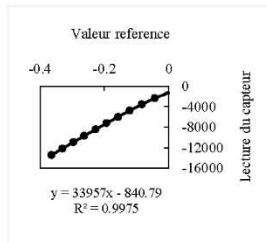
MOYENNE 32641.9



CALIBRATION

A19-4

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)
0	0.0015	-1240.307537	0	0.0002	-1126.888487	0	0.0014	-1371.313618
10.935626	-0.0443	-2359.890525	11.575662	-0.0461	-2259.256674	7.920453	-0.0451	-2496.774702
20.735186	-0.0845	-3571.379376	20.703184	-0.0877	-3505.578312	15.479885	-0.0859	-3703.345148
28.199613	-0.1222	-4787.675602	29.927711	-0.1264	-4755.257586	22.744301	-0.1247	-4929.881967
36.399082	-0.1581	-6015.933374	40.535318	-0.1636	-6010.234176	31.279789	-0.1615	-6172.612062
45.783618	-0.1935	-7248.954786	50.967915	-0.1992	-7264.605253	44.119524	-0.1972	-7436.732563
55.191157	-0.2282	-8475.105962	64.199672	-0.2353	-8549.361207	53.968087	-0.2313	-8641.347653
66.415799	-0.2631	-9725.759316	74.383255	-0.2696	-9810.660493	64.247675	-0.2658	-9889.76373
77.039406	-0.2971	-10965.23698	83.095753	-0.3035	-11064.59779	75.120296	-0.3002	-11148.46423
88.176044	-0.3306	-12195.79693	91.367226	-0.336	-12291.76692	86.071923	-0.3334	-12368.50052
99.951717	-0.3647	-13456.68718	101.47981	-0.3695	-13558.37768	102.08684	-0.3677	-13657.74509



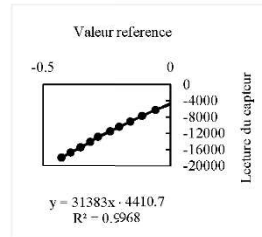
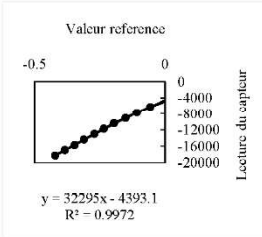
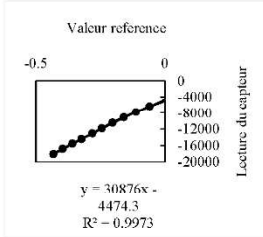
MOYENNE 34011.6



CALIBRATION

KFEL7-1A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0001	-4926.148529	0	0.0002	-4866.936413	0	0.0003	-4870.533829
5.152295	-0.0593	-6360.635643	6.376365	-0.057	-6272.175469	5.297303	-0.0582	-6273.66478
8.487486	-0.1125	-7811.273633	10.199584	-0.1078	-7736.239983	9.945569	-0.1096	-7733.569783
12.41571	-0.1598	-9155.785064	14.287817	-0.1513	-9099.544644	15.288875	-0.1557	-9104.832828
16.991972	-0.2038	-10485.54991	19.544118	-0.1954	-10398.24243	19.921139	-0.1987	-10395.07907
20.656182	-0.2448	-11857.16986	23.520345	-0.2343	-11727.67656	25.049433	-0.2386	-11730.28304
24.232386	-0.2819	-13104.85936	27.703585	-0.2713	-13008.24706	29.793704	-0.2861	-13047.45913
28.254616	-0.3242	-14446.69471	33.119895	-0.3105	-14389.69282	34.184955	-0.3162	-14315.90021
31.943827	-0.359	-15590.07177	37.544147	-0.3468	-15682.10826	38.769217	-0.3537	-15633.02828
35.584035	-0.3965	-16858.40661	41.240359	-0.3834	-16951.17061	43.337479	-0.3924	-16894.33353
39.232244	-0.433	-18115.57585	45.143582	-0.4212	-18245.54252	46.953685	-0.4282	-18140.45225



MOYENNE 31518

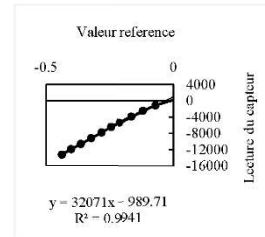
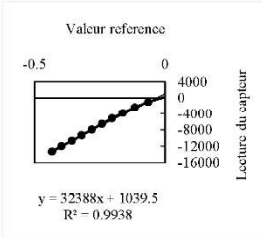
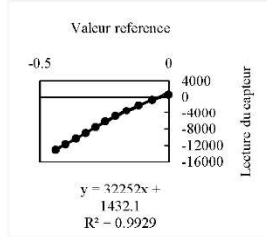




CALIBRATION

KFEL7-1B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	-0.0019	545.553412	0	0.0003	245.155388	0	0.0002	211.125916
6.943397	-0.0649	-703.706884	7.823447	-0.0649	-1028.937658	5.047289	-0.0691	-1164.707347
12.103693	-0.1175	-2042.229454	11.503658	-0.116	-2393.597105	8.775502	-0.1186	-2531.005822
17.055975	-0.1653	-3477.785596	15.503887	-0.1619	-3814.642848	12.58372	-0.1636	-3918.996647
22.168268	-0.208	-4868.406468	18.600064	-0.203	-5179.69329	15.599893	-0.2112	-5380.15934
27.823592	-0.2478	-6224.574441	22.639295	-0.2418	-6537.725529	18.664068	-0.2472	-6678.753719
32.791876	-0.2852	-7603.768287	27.671583	-0.2803	-7922.33553	22.007259	-0.284	-8036.211746
37.904168	-0.3233	-9015.362382	31.671811	-0.3195	-9334.96434	25.911482	-0.3244	-9423.500182
41.855394	-0.3609	-10369.77657	35.416026	-0.3572	-10665.04197	29.647696	-0.3642	-10795.00279
46.111638	-0.402	-11764.02881	39.063234	-0.3964	-11996.0764	33.135895	-0.4023	-12103.25986
49.679842	-0.4394	-13100.99034	43.239473	-0.4335	-13310.45578	36.664097	-0.438	-13395.60452



MOYENNE 32237

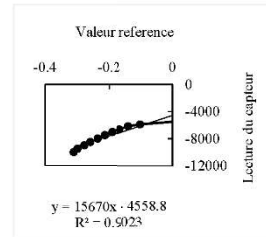
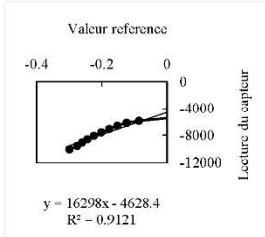
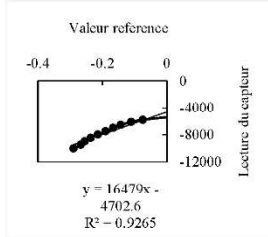




CALIBRATION

KFEM10-1B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0003	-5480.518362	0	0.0002	-5497.405738	0	0.0001	-5498.653129
6.729385	-0.0753	-5875.663939	6.552374	-0.0854	-5896.395545	6.9924	-0.1007	-5906.752293
12.161695	-0.1108	-6191.614374	9.976571	-0.1237	-6183.43728	11.352649	-0.1374	-6185.349738
16.505944	-0.1434	-6624.421083	13.608778	-0.1525	-6619.942877	15.063861	-0.1652	-6643.242127
20.737186	-0.1668	-7050.619725	17.223985	-0.1775	-7100.485047	18.728071	-0.1905	-7128.535484
25.465456	-0.1909	-7539.27654	21.776246	-0.2016	-7596.928003	23.120322	-0.2138	-7624.6663
29.641695	-0.2139	-8025.08231	26.064491	-0.2245	-8092.13854	26.368508	-0.2365	-8111.976138
33.449913	-0.2366	-8512.93398	30.112722	-0.2446	-8579.897079	29.840707	-0.259	-8597.85023
37.545147	-0.2549	-9009.979202	33.119894	-0.2606	-9060.701176	33.423912	-0.2774	-9086.508378
41.393367	-0.2676	-9510.195281	37.280132	-0.2756	-9545.772492	37.152125	-0.2984	-9581.283486
46.969687	-0.2902	-10044.90735	42.432427	-0.299	-10064.87368	40.728329	-0.3108	-10093.64804



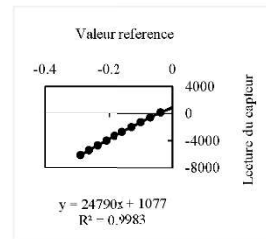
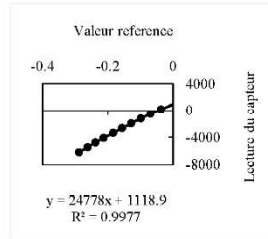
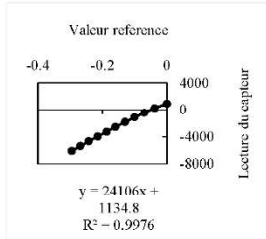
MOYENNE 16149.1



CALIBRATION

KFEL10-1B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	-0.0001	888.627483	0	0.0002	894.918786	0	0.0001	872.371938
7.375422	-0.0378	217.525069	5.712327	-0.0372	179.308483	5.361307	-0.037	153.090656
11.863678	-0.0704	-489.438984	8.864507	-0.0689	-524.78884	8.39348	-0.0687	-566.848592
15.7279	-0.1005	-1200.550162	12.255701	-0.0991	-1233.327744	11.585663	-0.0984	-1272.204554
19.727128	-0.1301	-1894.177811	15.943912	-0.1286	-1973.126747	15.113864	-0.1274	-2001.008765
24.231386	-0.1601	-2609.911576	19.632123	-0.1563	-2663.138608	18.433054	-0.1564	-2697.567416
28.007602	-0.187	-3311.50859	23.240329	-0.1832	-3356.210378	21.945255	-0.1837	-3408.394758
34.279961	-0.215	-4015.798959	26.720528	-0.2123	-4083.734528	24.953427	-0.2086	-4099.248001
39.095236	-0.2426	-4723.833771	30.41574	-0.2382	-4761.130809	28.153611	-0.2365	-4797.662306
42.911454	-0.2691	-5419.330355	34.175955	-0.2618	-5452.579216	32.097836	-0.2638	-5521.414197
49.223815	-0.2956	-6138.749427	37.94417	-0.288	-6182.214443	35.801048	-0.2893	-6206.449316



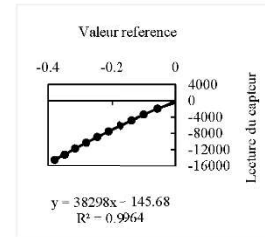
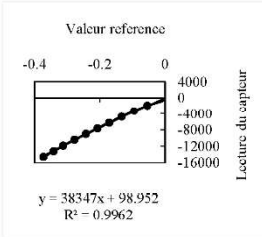
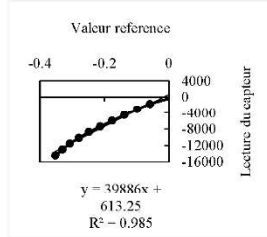
MOYENNE 24558.2



CALIBRATION

KFEM7-1A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0004	-359.93847	0	0.0015	-472.198561	0	0.0008	-445.985208
12.671725	-0.059	-1768.568974	9.488543	-0.0542	-1948.319998	9.479542	-0.0557	-1953.705735
21.248215	-0.0993	-3113.104665	16.599949	-0.0946	-3326.38525	17.167982	-0.0983	-3424.20155
30.359736	-0.138	-4525.653462	22.800304	-0.1331	-4761.705131	24.063376	-0.136	-4817.099271
43.423483	-0.1761	-5967.470687	28.799647	-0.1712	-6237.738271	31.791818	-0.1734	-6236.985887
57.312278	-0.2131	-7405.850807	35.232015	-0.2072	-7629.187323	40.311306	-0.2117	-7766.842089
67.583866	-0.2484	-8776.554396	41.25636	-0.2423	-9011.859067	48.503774	-0.2464	-9128.882111
77.599438	-0.2794	-10176.83631	50.455886	-0.2777	-10426.69566	57.863309	-0.2812	-10517.94346
86.271935	-0.3076	-11556.84996	65.263733	-0.3126	-11893.04023	66.775819	-0.3153	-11931.33266
95.767478	-0.3308	-13010.0676	72.832166	-0.3419	-13208.37119	77.423429	-0.3481	-13390.4544
105.856055	-0.3522	-14481.70086	80.744618	-0.3725	-14581.22718	85.415885	-0.3785	-14717.6998



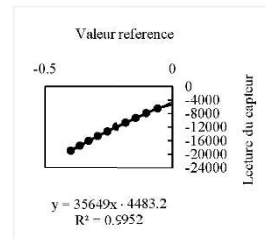
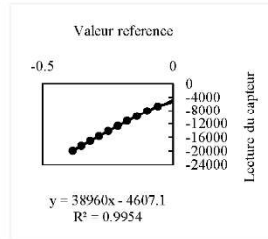
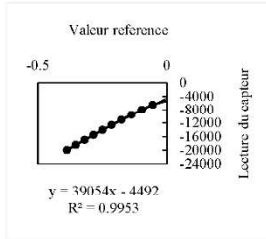
MOYENNE 38843.6



CALIBRATION

KFEM7-1B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0001	-5259.775195	0	0.0008	-5358.873863	0	0.0008	-5172.510169
6.911395	-0.0549	-6570.491749	9.552547	-0.0585	-6737.177394	7.33642	-0.0573	-6462.062851
13.519773	-0.0976	-8040.210509	15.184869	-0.0996	-8200.264856	14.527831	-0.1015	-7877.546975
23.448341	-0.1378	-9561.974667	20.536175	-0.1383	-9711.447337	22.576291	-0.1422	-9291.702821
36.096065	-0.1765	-11085.72746	26.584521	-0.1761	-11212.73193	30.24773	-0.1822	-10710.11104
51.983974	-0.2146	-12618.95374	30.496745	-0.2123	-12672.99894	37.472143	-0.222	-12128.48177
63.238617	-0.2503	-14091.39072	38.664212	-0.2485	-14163.54852	41.384367	-0.2576	-13519.99233
71.456087	-0.2849	-15601.47483	45.048577	-0.2842	-15615.29448	47.367709	-0.2955	-14890.55729
78.375483	-0.3197	-17020.41912	51.000917	-0.318	-17061.96472	50.847908	-0.3303	-16269.25181
85.567894	-0.3534	-18501.31224	56.288219	-0.3512	-18478.8605	54.936142	-0.3643	-17686.01059
92.680301	-0.3878	-20001.86716	61.71253	-0.3849	-19934.30856	60.16044	-0.3994	-19136.28644



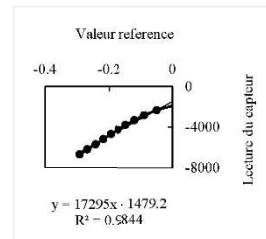
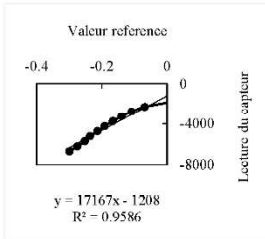
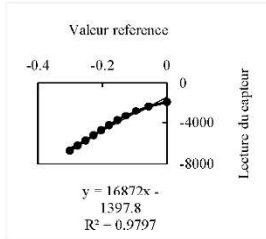
MOYENNE 37887.6



CALIBRATION

KFEM10-1A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0	-1888.038466	0	0.0002	-1869.728496	0	0.0004	-1893.768445
7.808447	-0.0569	-2332.320657	5.327305	-0.0685	-2303.567629	5.536316	-0.0493	-2345.206439
12.192698	-0.0962	-2817.643962	10.151581	-0.1086	-2776.552754	9.26453	-0.088	-2825.041413
16.751958	-0.1271	-3292.563978	13.727785	-0.139	-3260.486126	12.951741	-0.1182	-3314.17759
20.112151	-0.1539	-3774.330269	17.712013	-0.1664	-3743.850075	16.527946	-0.1459	-3787.404125
24.136381	-0.1795	-4248.258827	25.047433	-0.1911	-4233.851809	20.032146	-0.171	-4267.493989
28.168612	-0.2043	-4745.70832	29.031661	-0.2135	-4723.932265	24.248387	-0.195	-4759.354455
32.111837	-0.2284	-5243.467326	33.03989	-0.2364	-5221.891902	27.775589	-0.2187	-5253.129917
35.832049	-0.2531	-5753.786689	36.53609	-0.2518	-5706.824784	31.359794	-0.2425	-5754.80853
40.232301	-0.2774	-6235.515478	40.335307	-0.2753	-6208.006271	36.272075	-0.2683	-6261.933888
43.976515	-0.3011	-6727.336137	44.399539	-0.2992	-6707.775314	40.73633	-0.2925	-6749.979172



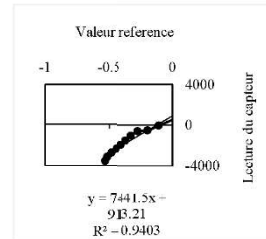
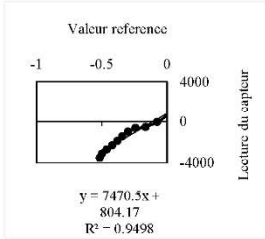
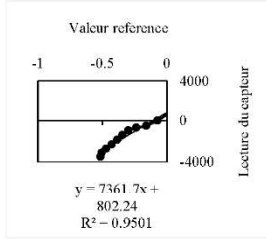
MOYENNE 17111.4



CALIBRATION

KFEM10-2B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0001	595.156692	0	0.0007	593.950579	0	0.0023	531.991072
3.449197	-0.073	14.137883	3.103178	-0.0752	-44.348529	5.008286	-0.1076	-56.68562
7.881451	-0.1618	-509.753628	6.247357	-0.1646	-529.012058	8.232471	-0.1926	-515.139972
11.36165	-0.2378	-675.603973	9.247529	-0.2414	-620.98528	11.663667	-0.271	-611.155026
15.137866	-0.2994	-935.791739	12.335705	-0.2993	-980.227146	15.351878	-0.3239	-1052.476171
18.849078	-0.3457	-1398.500875	15.415882	-0.3421	-1435.927099	18.456056	-0.3654	-1511.570582
22.305275	-0.3867	-1851.219452	18.464056	-0.3814	-1883.951897	21.568233	-0.4024	-1939.339343
26.873537	-0.4276	-2298.893934	21.304218	-0.4198	-2305.125921	25.448455	-0.4436	-2364.968353
30.665754	-0.4717	-2713.383056	24.247387	-0.4624	-2708.151236	28.774646	-0.4827	-2770.032409
34.160954	-0.5078	-3114.110198	27.727586	-0.4979	-3115.698126	32.295847	-0.5163	-3159.077544
37.849164	-0.5159	-3517.96402	32.223843	-0.516	-3519.720014	38.384195	-0.5332	-3566.635287



MOYENNE 7424.55

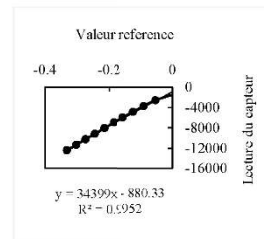
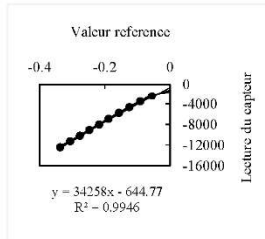
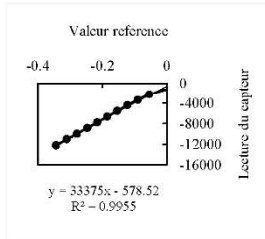




CALIBRATION

A19-5

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Canal 1 (Arith. Mean)
0	0.0003	-1173.770513	0	0.0002	-1289.377471	0	0.0005	-1473.89029
10.552604	-0.0546	-2245.707879	5.671325	-0.0554	-2394.932538	7.279417	-0.0528	-2576.201892
19.544118	-0.0906	-3351.488433	12.039689	-0.0909	-3519.333323	12.247701	-0.089	-3715.254336
26.592521	-0.1231	-4453.637192	19.024088	-0.1245	-4666.236289	17.199984	-0.1226	-4855.067839
33.334907	-0.1546	-5550.560659	25.503459	-0.1565	-5786.56412	21.912253	-0.1545	-5983.594335
40.928341	-0.1854	-6643.721886	32.559863	-0.188	-6908.554374	27.44757	-0.1853	-7090.063254
46.760674	-0.2164	-7761.859628	40.016289	-0.2176	-8018.724808	32.807877	-0.2153	-8203.558658
54.144097	-0.2472	-8863.023609	48.24776	-0.2476	-9110.161072	38.28019	-0.2451	-9305.409948
60.344451	-0.2792	-9967.655872	54.504118	-0.2765	-10197.24999	42.943456	-0.2742	-10380.69426
65.783762	-0.3108	-11061.70587	60.423456	-0.3061	-11290.29369	47.303706	-0.3028	-11445.98
72.800164	-0.3439	-12224.34578	67.919885	-0.3367	-12414.32102	51.92797	-0.332	-12527.37962



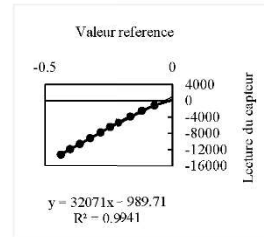
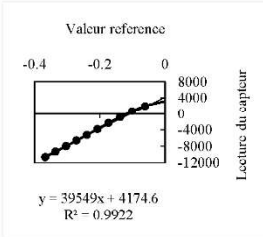
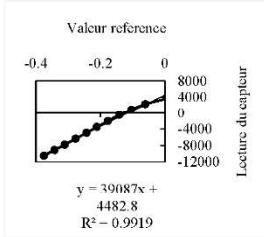
MOYENNE 34011



CALIBRATION

KFEL7-2A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0007	3517.054389	0	0.0013	3231.686222	0	0.0002	211.125916
10.367593	-0.0611	2235.728423	9.08752	-0.0614	1977.601746	5.047289	-0.0691	-1164.707347
24.583406	-0.1047	830.290381	18.376051	-0.1017	597.707305	8.775502	-0.1186	-2531.005822
32.423854	-0.1409	-566.600739	25.663468	-0.138	-870.696053	12.58372	-0.1636	-3918.996647
41.44837	-0.1772	-2067.007707	32.927884	-0.1731	-2348.226535	15.599893	-0.2112	-5380.15934
49.879853	-0.2113	-3548.711295	40.256303	-0.2069	-3806.924911	18.664068	-0.2472	-6678.753719
57.552292	-0.2439	-4966.008866	48.60678	-0.2395	-5238.876168	22.007259	-0.284	-8036.211746
66.822822	-0.2777	-6402.257139	56.904255	-0.2716	-6616.555489	25.911482	-0.3244	-9423.500182
78.192472	-0.3112	-7838.774103	64.247675	-0.3038	-7974.111215	29.647696	-0.3642	-10795.00279
87.335995	-0.3428	-9146.144887	72.400141	-0.336	-9317.362299	33.135895	-0.4023	-12103.25986
98.279621	-0.3758	-10523.14507	83.22376	-0.3675	-10649.95244	36.664097	-0.438	-13395.60452



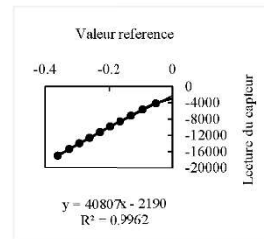
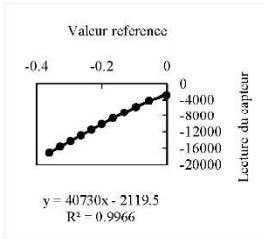
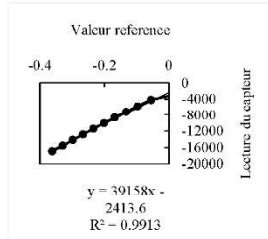
MOYENNE 36902.4



CALIBRATION

KFEL7-2B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0097	-3083.914121	0	-0.0016	-2847.456952	0	0.0011	-2857.256903
9.520545	-0.0557	-4274.194506	9.231528	-0.0555	-4226.147793	45.99063	-0.0516	-4153.717192
19.224099	-0.097	-5796.487327	15.887908	-0.0954	-5765.536602	53.616066	-0.0931	-5664.309986
26.672525	-0.1329	-7242.630311	23.639352	-0.1317	-7239.646299	61.255503	-0.1283	-7199.811658
35.376023	-0.1685	-8718.685159	31.623809	-0.1663	-8678.323379	69.655984	-0.1632	-8643.731668
42.560434	-0.2017	-10084.05353	40.511317	-0.2001	-10118.38986	77.767448	-0.1973	-10058.79978
50.287876	-0.2342	-11455.40189	47.687727	-0.2319	-11474.72467	84.991861	-0.2292	-11450.55169
58.160326	-0.2667	-12842.0013	55.24016	-0.2642	-12851.1361	93.559351	-0.2616	-12853.31591
65.464744	-0.2986	-14219.95689	64.927713	-0.2961	-14241.43097	101.27979	-0.2931	-14209.6111
72.760161	-0.3303	-15591.07416	72.544149	-0.3274	-15599.74472	110.67933	-0.3249	-15599.0346
81.240646	-0.362	-16956.96573	87.784021	-0.3607	-17063.73097	140.38403	-0.3607	-17172.28943



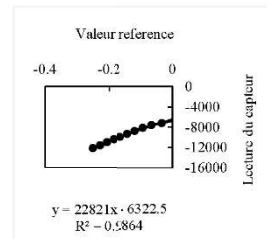
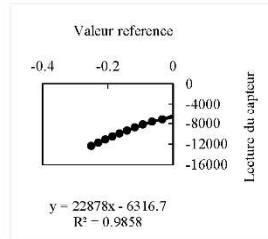
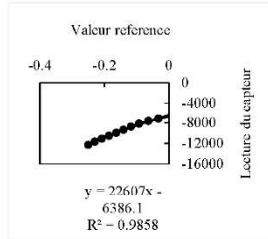
MOYENNE 40231.9



CALIBRATION

KFEL10-2A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0012	-6770.775492	0	0.0011	-6707.962431	0	0.0016	-6704.428487
9.111521	-0.0325	-7250.34064	9.135523	-0.0328	-7199.403279	8.823504	-0.0327	-7193.110648
17.263988	-0.064	-7685.387798	15.999915	-0.0645	-7632.663563	17.536003	-0.0654	-7628.731792
23.815362	-0.0924	-8207.549171	22.784303	-0.0925	-8163.80937	26.271502	-0.0921	-8164.301315
30.783761	-0.1176	-8789.001446	28.871652	-0.1171	-8752.753061	34.199956	-0.1177	-8765.801968
37.895168	-0.1412	-9391.1076	35.400025	-0.1411	-9350.547477	41.376366	-0.1407	-9354.763018
44.415541	-0.1639	-9973.788523	42.407426	-0.1638	-9945.629252	48.719787	-0.1634	-9944.780508
51.015918	-0.1863	-10560.47099	49.095808	-0.186	-10534.77749	56.088208	-0.1857	-10537.2066
58.295334	-0.2085	-11147.48795	56.008204	-0.2078	-11116.75852	62.951601	-0.2074	-11116.4779
65.471745	-0.23	-11731.17387	62.631582	-0.2291	-11697.21605	69.367968	-0.2287	-11689.54009
73.871225	-0.2504	-12325.98393	76.520377	-0.2506	-12337.03827	77.45543	-0.2508	-12292.20895



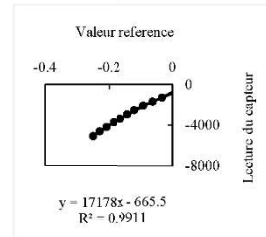
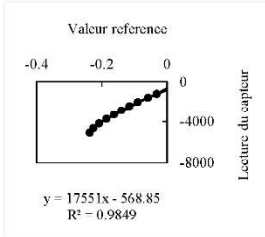
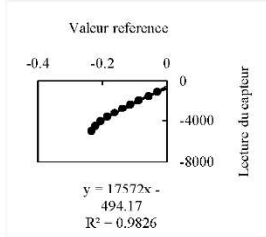
MOYENNE 22768.7



CALIBRATION

KFEL10-2B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0029	-691.515988	0	0.0009	-794.246355	0	0.0011	-883.071789
10.583605	-0.0304	-1095.403379	12.151695	-0.0315	-1196.205939	8.335476	-0.0325	-1280.21598
18.896081	-0.0565	-1499.360962	20.600178	-0.0587	-1598.280083	14.503829	-0.0612	-1684.142915
27.407568	-0.0877	-1912.331443	28.599636	-0.0897	-2012.266304	21.016202	-0.0907	-2093.060785
36.224072	-0.1138	-2324.020286	41.240359	-0.1155	-2423.40967	27.647581	-0.1185	-2543.016127
44.382538	-0.1383	-2743.01486	49.415826	-0.1395	-2852.585798	34.863994	-0.1404	-2940.209642
52.688014	-0.1622	-3177.35557	56.928256	-0.1623	-3275.988627	41.488373	-0.1631	-3370.750089
60.615467	-0.1853	-3614.397757	64.607695	-0.1855	-3725.562221	48.407769	-0.1856	-3805.916513
67.855881	-0.2061	-4065.756889	71.576094	-0.2081	-4164.086114	56.216215	-0.2086	-4268.348772
75.159299	-0.2224	-4517.251434	79.168528	-0.2257	-4629.478405	63.095609	-0.2297	-4703.307996
85.591896	-0.2347	-5002.206626	86.391941	-0.2371	-5081.898278	70.368024	-0.2505	-5166.788304



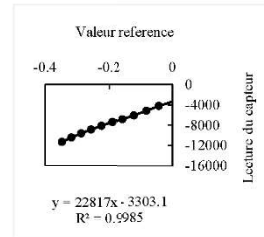
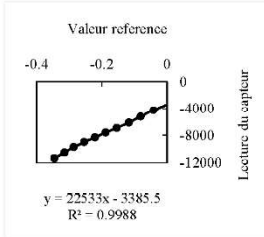
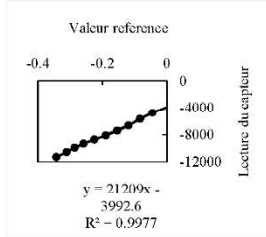
MOYENNE 17433.7



CALIBRATION

KFEM7-2A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0018	-3910.10971	0	0.0022	-3371.253914	0	0.0029	-3331.571054
6.904395	-0.0449	-4787.329632	7.832448	-0.0416	-4264.062984	10.071576	-0.042	-4236.029201
13.623779	-0.0836	-5735.39694	14.656838	-0.081	-5221.64283	15.231872	-0.0811	-5178.324517
20.000144	-0.119	-6671.695086	20.096149	-0.1171	-6125.182589	21.080206	-0.1193	-6078.673086
27.206556	-0.1547	-7467.764304	27.384566	-0.1543	-6914.231174	27.375566	-0.1555	-6839.354924
34.007945	-0.1899	-8139.333492	33.967943	-0.188	-7598.525378	33.551919	-0.1908	-7564.645158
40.976344	-0.2252	-8752.513118	39.480258	-0.2211	-8283.961502	39.440256	-0.2239	-8300.704479
48.231759	-0.2589	-9362.533784	45.27259	-0.2542	-8995.633758	47.359709	-0.2563	-9031.081672
55.352166	-0.2864	-9950.127942	50.782905	-0.2864	-9729.200624	53.160041	-0.2876	-9792.254353
61.959544	-0.3113	-10570.15175	56.704244	-0.3148	-10518.26318	59.248389	-0.3177	-10603.25624
69.279963	-0.3431	-11311.84475	62.672585	-0.3461	-11339.85339	65.39174	-0.3472	-11435.00612



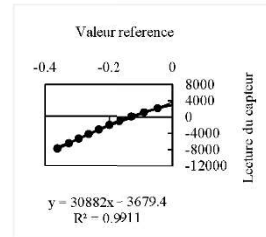
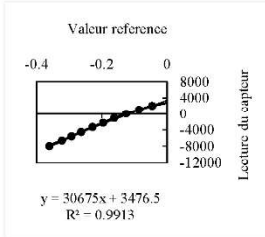
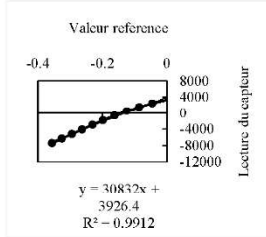
MOYENNE 22186.6



CALIBRATION

KFEM7-2B

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.0002	3262.305385	0	0.0014	2820.878564	0	0.0004	3016.217092
3.408195	-0.0456	2401.8518	5.863335	-0.0455	2021.866488	2.832162	-0.0461	2136.599325
7.223413	-0.0861	1441.653391	8.703498	-0.0856	1020.915548	5.543317	-0.0878	1144.248441
11.00763	-0.1252	431.837804	11.479657	-0.1245	-8.995985	8.03946	-0.127	109.229269
13.591777	-0.1628	-719.45523	14.303818	-0.1619	-1108.214602	10.879622	-0.1654	-1032.515574
17.431997	-0.1985	-1863.869856	17.447998	-0.1961	-2242.542617	13.959799	-0.1997	-2154.572007
20.752187	-0.231	-2988.294516	20.800189	-0.2289	-3333.985699	16.911967	-0.2325	-3290.024452
24.327392	-0.2636	-4131.073296	25.447455	-0.263	-4524.390613	19.880137	-0.264	-4406.15732
27.535575	-0.2951	-5249.846994	28.911654	-0.2934	-5584.158606	23.367337	-0.2952	-5513.628827
30.887767	-0.3265	-6367.362396	32.087835	-0.3222	-6638.659779	27.071548	-0.3257	-6625.006176
34.26396	-0.3564	-7485.177779	46.463657	-0.3608	-8000.114548	35.240016	-0.361	-7887.503447



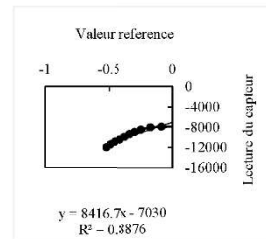
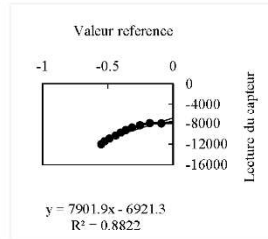
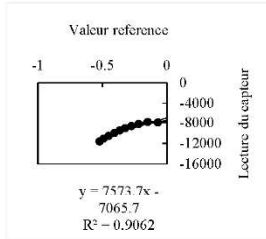
MOYENNE 30796.4



CALIBRATION

KFEM10-2A

PREMIER			DEUXIEME			TROISIEME		
X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)	X_Value	Untitled	Strain (Arith. Mean)
0	0.001	-7642.549127	0	0.0001	-7701.783542	0	0.0006	-7888.001448
3.200183	-0.0695	-7984.966815	6.543374	-0.0902	-7981.51901	3.176182	-0.0835	-7935.889756
6.399366	-0.1486	-7909.497946	11.415653	-0.1779	-7931.305068	6.736385	-0.1705	-8053.996118
10.391594	-0.2186	-8281.466583	15.815905	-0.2539	-8342.008533	10.272588	-0.2435	-8493.258053
13.327762	-0.2753	-8678.516037	19.784132	-0.3151	-8798.178267	13.256758	-0.2942	-8928.013251
17.111979	-0.3229	-9090.839642	23.679354	-0.3611	-9275.333243	16.351935	-0.3346	-9382.441763
20.704184	-0.3662	-9542.002975	26.951541	-0.4005	-9787.839955	19.40811	-0.3731	-9930.048351
24.271388	-0.4066	-10035.15303	30.791761	-0.4404	-10353.17339	22.536289	-0.4114	-10468.59707
28.119608	-0.4536	-10581.80958	34.743987	-0.4857	-10915.39433	25.920483	-0.4528	-11007.82485
31.81582	-0.4917	-11121.42052	38.184184	-0.524	-11456.30239	29.512688	-0.4896	-11541.62664
35.160011	-0.5238	-11664.64053	42.927455	-0.5512	-12038.02835	34.103951	-0.5214	-12097.83329



MOYENNE 7964.12



## Annexe J

### Essais AMAC

Mesure de la force de liaison entre les couches d'enrobé

Date: 28 novembre 2019 Technicien: Roger Kowalick  
 Municipalité: Ste-Foy Technicien: Edith Bonleant  
 Route: Université Faval Technicien: Charles Robert, Levesque

Carotte	Localisation		Heure	Température (°C)		Carottage (mm)	Contrainte maximale		Commentaires
	voie N S E O	voie N S E O		Air	Surface Interface		psi	MPa	
1			10:35	16.2	15.4	75		246	Cassé dans l'interface
2									
3			10:40	16.5	15.3	75		378	Cassé dans l'interface
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Remarques: Carottage à 85 mm pour essai de Amac

dessin 874(40)15

Emplacement des essais AMAC  
 et des carottages du 22 nov. 2019

151  
 501

CR-1  
 CR-2  
 CR-3  
 CR-4

Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de base		
1	2291	2283	2259
	2321	2285	
2	2397	2361	2407
	2424	2378	
3	2498	2468	2536
	2470	2426	
4	2452	2318	2387
	2393	2422	
5	2433	2454	2425
	2458	2497	

Densités (kg/m <sup>3</sup> ) obtenues avec un nucléodensimètre			
Emplacement	Couche de surface		
1	2404	2371	2408
	2386	2377	
2	2401	2397	2396
	2418	2389	
3	2360	2371	2382
	2363	2368	
4	2360	2375	2370
	2413	2385	
5	2269	2299	2307
	2312	2316	
6	2434	2455	2452
	2430	2421	
7	2329	2327	2321
	2320	2317	
8	2305	2288	2296
	2287	2295	
9	2261	2254	2256
	2260	2267	
10	2331	2333	2332
	2344	2347	

Note: L'emplacement #10 n'a pas été mesuré donc inexistant sur le plan.

Épaisseur des 4 carottes

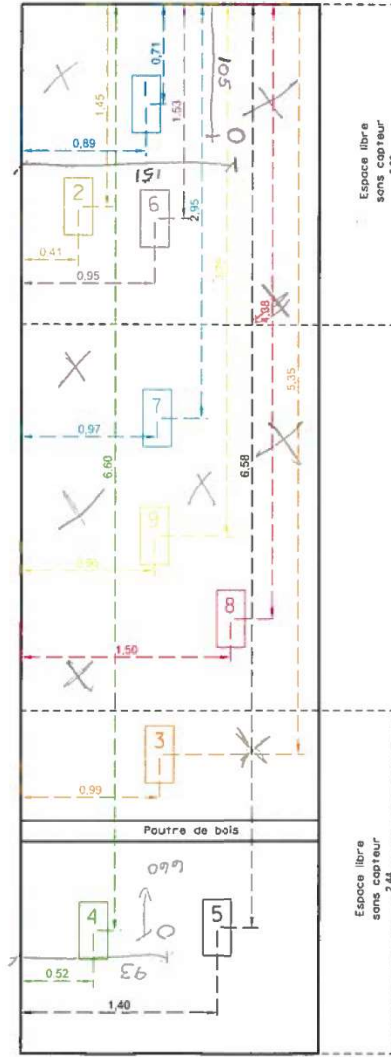
CR-1 = 155

CR-2 = 148

CR-3 = 155

CR-4 = 155

surface = 75m  
 base = 80m



\* Toutes les mesure sont en mètre

Porte de garage

dossier 871(040)15