

RAPPORT

Étude comparative entre deux produits de liaisonnement d'enrobé bitumineux : La bande bitumineuse et le liant d'accrochage



RÉSEAUX
TECHNIQUES URBAINS



INFRASTRUCTURES
DE SURFACE

MISSION DU CERIU —

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

À PROPOS

LE CERIU

Fondé en 1994, le CERIU est un organisme sans but lucratif **né du besoin de réhabiliter les infrastructures municipales de façon performante.**

Aujourd'hui, grâce à son leadership reconnu et à l'expertise variée de ses **140 membres organisationnels** regroupant municipalités, entreprises, ministères, laboratoires et institutions d'enseignement et à son approche unique axée sur le partenariat et la concertation, le CERIU est le seul organisme à offrir une perspective intégrée de la problématique des infrastructures municipales. Il œuvre en concertation avec ces milieux à changer les mentalités et les habitudes en soutenant l'innovation, la formation, le développement du savoir-faire et le transfert de connaissance pour répondre aux défis que pose la pérennité des infrastructures.

LE CONSEIL PERMANENT RÉSEAUX TECHNIQUES URBAINS (RTU) DU CERIU

Né de la mobilisation des acteurs du milieu, le conseil permanent Réseaux techniques urbains (RTU) du CERIU encourage les meilleures pratiques de planification de travaux, de coordination des interventions et de construction de réseaux techniques urbains par des activités de sensibilisation, de discussion, de formation, de recherche, de veille, de développement et de transfert dans un cadre de développement durable de l'ensemble des infrastructures municipales.

AVANT-PROPOS

Ce projet s'est réalisé en deux phases.

Arthur Rerolle, étudiant en maîtrise à l'École de technologie supérieure et sous la direction du professeur Michel Vaillancourt mène en 2015 la première phase du projet. Les essais de laboratoire réalisés lors de cette phase portent essentiellement sur des échantillons fabriqués en laboratoire. En effet, bien que le programme d'essais initial comprend des essais sur des échantillons provenant de chaussées réelles réparées, aucun échantillon n'est prélevé durant la période de travaux de cet étudiant. Le programme original a été réalisé partiellement, la section sur les échantillons chantier n'a pas été étudiée.

À la seconde phase, Samuel Pothier complète l'étude et analyse les résultats :

- Tout d'abord, la réalisation d'essais sur des échantillons provenant d'une chaussée réelle réparée avec les deux systèmes d'accrochage ;
- Par la suite, l'amélioration de la fabrication d'échantillons en laboratoire pour les rendre plus représentatifs de ce qui se fait en chantier.

En effet, lors de la phase 2015 de l'étude, le joint est mis en place horizontalement augmentant ainsi le liaisonnement lors de la mise en place et de la compaction de la seconde couche d'enrobé. Dans la présente étude, le liaisonnement est installé verticalement. Finalement, des essais de traction directe complets ainsi que des essais de traction indirecte (flexion) sont réalisés afin de mieux évaluer la différence d'accrochage entre les deux systèmes.

Aucun des essais réalisés ne suit une norme puisqu'aucune norme, du moins à notre connaissance, ne permet de caractériser le joint mis en place lors de la réparation d'une chaussée. Le matériau de réparation est bien caractérisé par plusieurs normes (Annexe 2), cependant, la force et l'étanchéité des joints en place ne le sont pas.

Ce rapport porte sur les essais et résultats réalisés dans la seconde phase du projet. Le rapport de la précédente phase, qui inclut une revue de littérature, est présenté à l'Annexe 2.

REMERCIEMENTS

Le CERIU tient à remercier chaleureusement les membres du comité de travail pour leur dévouement et leurs précieuses contributions.

Cette étude a reçu le soutien financier de Mitacs dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

L'ÉQUIPE

- Supervision par : **le conseil permanent Réseaux techniques urbains**
- Coordination par : **Salamatou Modieli**, ing., M. ing., coordonnatrice de projets, CERIU
- Gérance de projet par : **Alain Caissy**, ing., M. Sc., chargé de projet
- Recherche et rédaction par : **Samuel Pothier**, étudiant à l'École de technologie supérieure
- Supervision universitaire par : **Michel Vaillancourt**, ing., Ph. D., professeur à l'École de technologie supérieure

MEMBRES DU COMITÉ DE TRAVAIL

- **Mohamed Salah Aboudi**, ing. Énergir
- **Éric Drapeau**, ing. Ville de Montréal
- **Yanick Martin**, ing., M.Sc.A. Hydro-Québec
- **Denis Poirier**, ing., M.G.P. Commission des services électriques de Montréal
- **Saliha Yahmi**, ing., M. Ing. Ville de Longueuil

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. DIFFÉRENCES ENTRE LES ÉTUDES DE 2015 ET 2017	2
2.1 Essais retranchés.....	2
2.2 Essais supplémentaires	2
2.3 Amélioration de la méthode de fabrication des éprouvettes en laboratoire	2
3. ÉCHANTILLONNAGE DES SYSTÈMES DE LIAISONNEMENT	5
3.1 Chantier #1	5
3.2 Chantier #2.....	6
3.3 Fabrication des systèmes de liaisonnement en laboratoire	8
3.4 Fabrication des poutres pour essai de flexion	12
4. ESSAIS EN LABORATOIRE	14
4.1 Perméabilité	14
4.2 Traction (arrachement).....	16
4.3 Orniérage.....	17
4.4 Flexion	18
4.5 Programme d'essais	20
5. RÉSULTATS ET ANALYSE	21
5.1 Perméabilité	21
5.2 Traction (arrachement).....	24
5.3 Comportement des systèmes à l'orniérage.....	28
5.4 Performance à la flexion	28
5.4.1 Systèmes non sollicités.....	29
5.4.2 Systèmes sollicités.....	31
5.4.3 Résumé des résultats d'essais de flexion	36
6. ESTIMATION DE COÛTS.....	38
6.1 Liant d'accrochage.....	38
6.2 Bande bitumineuse	38
7. DISCUSSION	40
8. CONCLUSION	42
9. RÉFÉRENCES	43
ANNEXE 1 – Graphiques d'orniérage	44
ANNEXE 2 – Rapport d'étude 2015.....	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : a) Éprouvette cylindrique avec joint vertical pour essais de perméabilité, b) Éprouvette cylindrique avec joint transversal pour essais de perméabilité et d'arrachement et c) Poutre avec joint transversal pour essais de flexion (2017).....	2
Figure 2 : a) Positionnement des éprouvettes sur une demi-plaque avec bande bitumineuse prête à être compactée à plat et b) Structure granulaire d'un joint de bande bitumineuse compacté à plat (2015)	3
Figure 3 : a) Éprouvettes de 50 mm de diamètre préparées dans les échantillons de 150 mm prélevés au chantier et b) Structure granulaire typique de ces éprouvettes de bande bitumineuse chantier (2016).....	3
Figure 4 : a) Éprouvettes de 50 mm de diamètre dans une plaque avec joint vertical préparées en laboratoire et b) Structure granulaire typique de ces éprouvettes de bande bitumineuse (2017).....	4
Figure 5 : a) Installation de 2 bandes bitumineuses de haut sur une coupe dans la chaussée et b) Détail de la chaussée du chantier #1, 50 mm d'enrobé sur 50 mm remblai sans retrait (échec)	5
Figure 6 : Vue de la tranchée à l'étude	6
Figure 7 : Préparation de la couche finale et compaction graduelle au rouleau.....	7
Figure 8 : Préparation des échantillons au centre du joint.....	7
Figure 9 : Exemples de fissurations et décollements causés par le carottage (éprouvettes de 50 mm de diamètre).....	8
Figure 10 : Plaque d'enrobé sciée longitudinalement.....	9
Figure 11 : a) Pose de la bande bitumineuse à la verticale (2017) longitudinalement et b) Pose de la bande bitumineuse à la verticale (2017) transversalement.....	9
Figure 12 : a) Plaque avec joint transversal en position basse dans le compacteur, b) Planches de bois pour confiner l'enrobé à compacter du bon côté du joint (transversal) et c) Planches de bois pour confiner l'enrobé à compacter du bon côté du joint (longitudinal).....	10
Figure 13 : a) Premières passes de compaction sur joint transversal et b) Dernières passes de compaction sur joint transversal	10
Figure 14 : a) Bourrelet visible à la surface d'une plaque réparée avec un joint longitudinal de bande bitumineuse et b) Plaque avec joint longitudinal de colasse.....	11
Figure 15 : a) Joint dans la plaque avec liant d'accrochage standard (côté du moule) et b) Joint dans la plaque avec bande bitumineuse (côté du moule).....	11
Figure 16 : Position et numérotation des échantillons taillés dans une plaque d'enrobé avec joint transversal ...	12
Figure 17 : Position des échantillons taillés dans une plaque d'enrobé avec joint longitudinal.....	12
Figure 18 : a) Poutre du joint de bande bitumineuse orniérée et b) Poutre du joint avec liant d'accrochage orniérée	13
Figure 19 : Montage de perméabilité eau-vacuum.....	14
Figure 20 : Échantillon de bande bitumineuse dans la presse MTS	16
Figure 21 : Plaque d'enrobé de surface dans l'orniéreur	17
Figure 22 : Position des mesures d'affaissement sur un système avec joint transversal.....	18
Figure 23 : a) Vue globale du montage pour essai de flexion sur éprouvettes poutres et b) Appui double supérieur centré sur un joint de bande bitumineuse	19
Figure 24 : Perméabilité moyenne des éprouvettes de laboratoire et de chantier	21
Figure 25 : Graphique d'arrachement des échantillons intacts prélevés au chantier	24
Figure 26 : a) et b) Comportement ductile d'une éprouvette de bande bitumineuse lors de la traction et c) Éprouvette de bande bitumineuse rompue et recollée	25
Figure 27 : Graphique d'arrachement des éprouvettes fabriquées au laboratoire	26
Figure 28 : Graphique d'arrachement des éprouvettes chantier utilisées pour la perméabilité.....	27
Figure 29 : Éprouvettes BB6, BB5 et BB1 avec bande bitumineuse toutes rompues dans l'enrobé.....	27
Figure 30 : Comparaison de l'affaissement pour chacun des systèmes de liaison orniérés (30 000 cycles)	28
Figure 31 : Résultats de flexion des éprouvettes intactes de colasse (liant d'accrochage) et de bande bitumineuse	29
Figure 32 : a) Fissuration de l'éprouvette liant d'accrochage #A4 au centre du joint et b) Fissuration de l'éprouvette liant d'accrochage #A5 au centre du joint.....	30

Figure 33 : a) Éprouvette #A2 non sollicitée de bande bitumineuse simplement appuyée et b) Décollement de la bande bitumineuse du côté scié	31
Figure 34 : a) Éprouvette #A4 non sollicitée de bande bitumineuse simplement appuyée et b) Décollement de la bande bitumineuse du côté scié	31
Figure 35 : Résultats de flexion des éprouvettes témoins ayant subi 30 000 cycles d'orniérage.....	32
Figure 36: a) Éprouvette poutre témoin #o6 d'enrobé orniéré sous la presse et b) Fissuration de l'éprouvette poutre témoin #o6 Systèmes avec liaisonnement	32
Figure 37 : Résultats de flexion des éprouvettes de plaques orniérées (haut de plaque)	33
Figure 38 : Rupture des échantillons de bande bitumineuse #o6 et #o5 dans l'enrobé.....	34
Figure 39 : Résultats de flexion des éprouvettes de plaques orniérées (bas de plaque)	35
Figure 40 : Flexion importante des éprouvettes avec bande bitumineuse #o1, #o2 et #o3, déchirement dans l'enrobé	35
Figure 41 : Flexion de 3 mm causant la rupture complète dans le joint des éprouvettes #o1, #o2 et #o3 avec liant d'accrochage	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Programme d'essais	20
Tableau II : Résumé de tous les essais de perméabilité (moyenne des essais réalisés)	22
Tableau III : Résultats complets (2017) de perméabilité des échantillons à une succion de 100 kPa.....	23
Tableau IV : Résumé des essais de flexion	37
Tableau V : Ratio du scellement de joint sur le coût des travaux	39

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente une étude qui porte sur la comparaison de deux systèmes de liaisonnement d'enrobé bitumineux. Ces systèmes de liaisonnement sont des assemblages de deux pièces d'enrobé bitumineux compacté à chaud, liées par soit un liant d'accrochage standard ou une bande bitumineuse.

Les essais présentés tentent de comparer la performance des liants d'accrochage et de la bande bitumineuse selon deux critères importants :

1. Leur capacité à étanchéiser un joint de construction dans l'enrobé bitumineux ;
2. Leur capacité à lier les deux surfaces de ce joint de construction.

Cette étude, réalisée en 2016-2017, permet d'améliorer les résultats obtenus en 2015 en modifiant l'approche de fabrication des systèmes en laboratoire afin qu'ils soient plus représentatifs et en y ajoutant un essai de flexion.

Cette étude compare également les échantillons prélevés au chantier et ceux fabriqués au compacteur de plaque d'enrobé du Laboratoire sur les chaussées et les matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure.

Ce rapport expose d'abord les principales différences entre l'étude de 2015 et celle de 2017, puis détaille la description de la pose au chantier, l'échantillonnage au chantier, la méthode de fabrication des systèmes de liaisonnement en laboratoire, la préparation des éprouvettes, la description des essais, les résultats ainsi que l'analyse. Une brève analyse des coûts d'achat et de pose des produits utilisés est aussi présentée.

2. DIFFÉRENCES ENTRE LES ÉTUDES DE 2015 ET 2017

2.1 Essais retranchés

Compte tenu du climat québécois, il est probable que les joints s'altèrent par les cycles saisonniers et quotidiens de gel et de dégel. Dans le rapport de 2015, des essais concernant l'impact d'un cycle de gel-dégel sur la performance d'un joint de liaisonnement avaient été réalisés. Les essais évaluaient si la performance des joints de bande bitumineuse et de liant d'accrochage s'altère par le gel et le dégel. Les résultats obtenus ne sont pas présentés dans ce rapport, les essais n'étant pas concluants. La présente étude n'aborde pas cet aspect, faute de temps pour développer un nouvel essai. Il serait intéressant de faire une étude additionnelle en établissant un protocole d'essais et un montage permettant d'évaluer ce facteur d'endommagement.

2.2 Essais supplémentaires

Afin de valider sur un montage différent les performances mécaniques des joints, des essais de flexion sur poutre se sont ajoutés au programme.

De plus, des plaques d'enrobé sont fabriquées pour réaliser des essais d'orniérage à 60 °C pour suivre le comportement des joints transversaux soumis à de multiples passages de roues chargées.

2.3 Amélioration de la méthode de fabrication des éprouvettes en laboratoire

La méthode de fabrication des éprouvettes en laboratoire est améliorée pour que les échantillons construits en laboratoire soient plus représentatifs des échantillons prélevés en chantier. La Figure 1 (a et b) montre les deux positions de joints à l'étude : joint vertical et joint horizontal (transversal). L'éprouvette poutre s'ajoute au programme pour réaliser l'essai de flexion (Figure 1c).

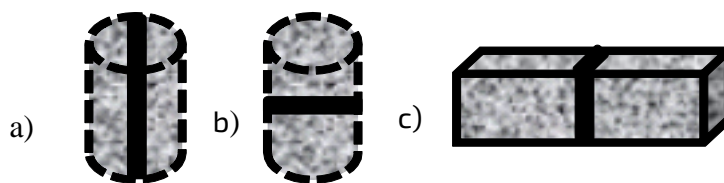


Figure 1 : a) Éprouvette cylindrique avec joint vertical pour essais de perméabilité,
b) Éprouvette cylindrique avec joint transversal pour essais de perméabilité et d'arrachement et
c) Poutre avec joint transversal pour essais de flexion (2017)

La Figure 2a présente une bande bitumineuse installée à plat tel que réalisé dans la première étude et les conséquences de compacter le joint à plat. La bande bitumineuse est surcompactée et elle s'imprègne à travers le mélange d'enrobé. Cela a pour conséquence de boucher les pores de l'échantillon (Figure 2b), ce qui peut expliquer la perméabilité nulle des éprouvettes avec un joint vertical lors des essais réalisés en 2015. Le comportement des joints à l'arrachement (traction directe) des échantillons de la précédente étude a probablement aussi été affecté par cette mise en place.

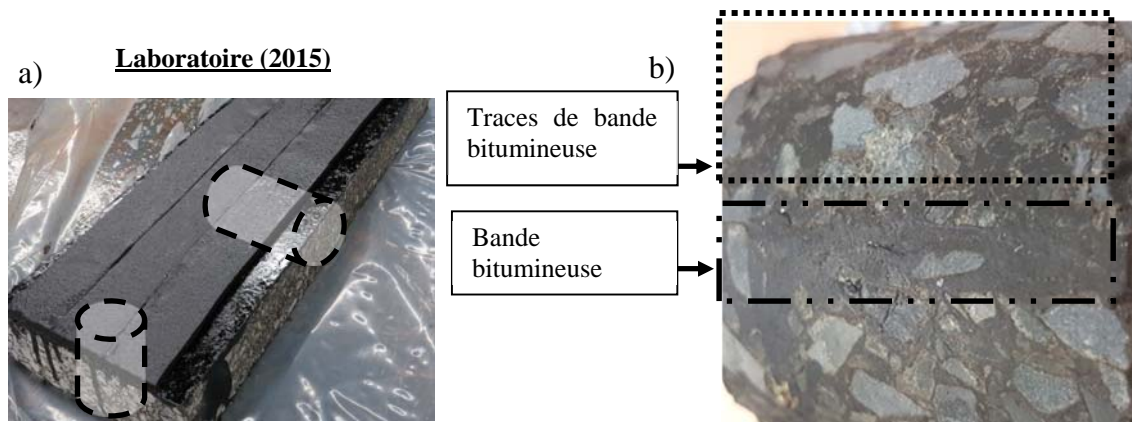


Figure 2 : a) Positionnement des éprouvettes sur une demi-plaque avec bande bitumineuse prête à être compactée à plat et b) Structure granulaire d'un joint de bande bitumineuse compacté à plat (2015)

La Figure 3a et la Figure 4a montrent l'orientation des éprouvettes dans l'échantillon mère (chantier et laboratoire). La ressemblance des structures granulaires est flagrante (Figure 3b et Figure 4b) en comparaison avec les éprouvettes de 2015 (Figure 2b). Pour ces raisons, l'étude de 2017 ne traite que de ces nouveaux échantillons qui sont plus fidèles à celle du manufacturier (installation sur surface verticale sciée).

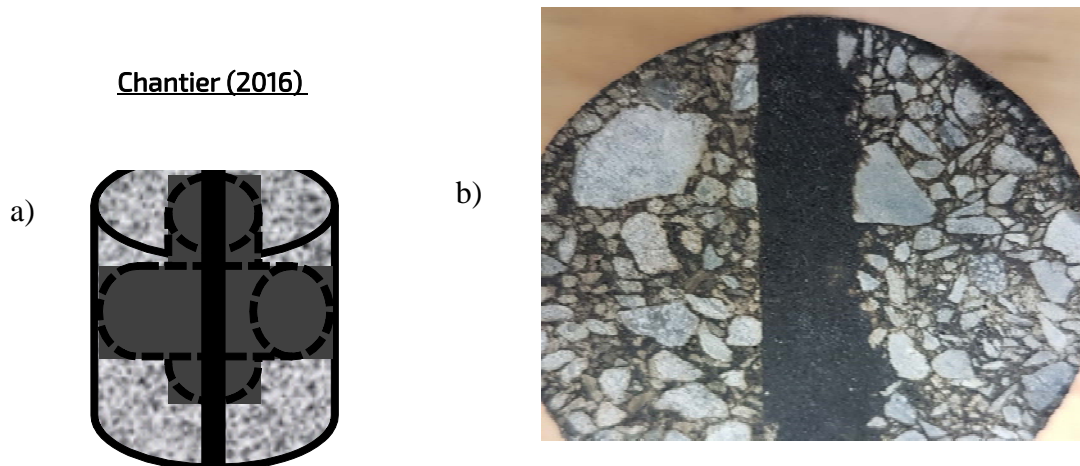


Figure 3 : a) Éprouvettes de 50 mm de diamètre préparées dans les échantillons de 150 mm prélevés au chantier et b) Structure granulaire typique de ces éprouvettes de bande bitumineuse chantier (2016)

Laboratoire 2017 :

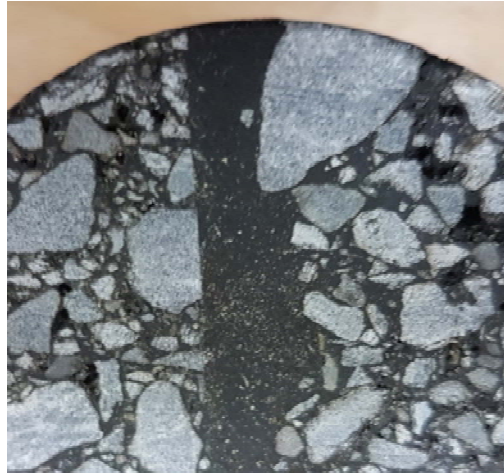
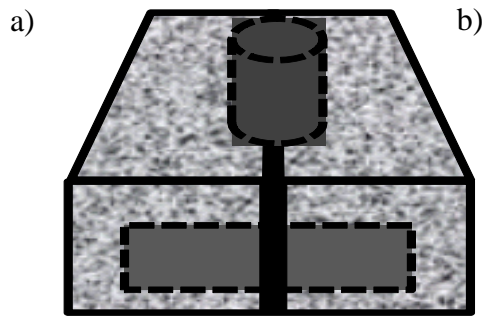


Figure 4 : a) Éprouvettes de 50 mm de diamètre dans une plaque avec joint vertical préparées en laboratoire et b) Structure granulaire typique de ces éprouvettes de bande bitumineuse (2017)

3. ÉCHANTILLONNAGE DES SYSTÈMES DE LIAISONNEMENT

Dans ce document, on appelle système de liaisonnement l'assemblage de deux pièces d'enrobé bitumineux au moyen d'un produit de liaisonnement. La première pièce représente la chaussée existante avec une face sciée. La seconde pièce est compactée à côté de la première après la mise en place au préalable du produit (bande bitumineuse ou liant d'accrochage) qui permet le liaisonnement des deux pièces apportant une force mécanique ainsi qu'une certaine imperméabilité dans le joint.

La collecte d'échantillons en chantier doit être réalisée avec grand soin afin que la comparaison des produits de liaisonnement d'enrobé soit représentative de la réalité. Une anomalie, même très petite, peut faire perdre beaucoup de résistance mécanique et faciliter le passage de l'eau dans l'éprouvette. Les échantillons prélevés au chantier ont un diamètre de 150 mm. Des éprouvettes de 50 mm sont ensuite fabriquées pour réaliser l'essai d'arrachement et l'essai de perméabilité.

3.1 Chantier #1

Deux chantiers ciblés font l'objet de l'installation des systèmes de liaisonnement. L'installation des systèmes sur un premier chantier sur la rue William, à l'ouest de la rue Murray, près de l'École de technologie supérieure, s'avère non représentative, car l'épaisseur de l'enrobé bitumineux existant sur la rue est plus faible qu'anticipée. Au moins 100 mm d'enrobé est nécessaire pour obtenir des éprouvettes de grosseur représentative à tester au laboratoire (2 bandes bitumineuses de large).

Cette coupe dans la chaussée en bordure d'un trottoir est effectuée à l'endroit où une réparation avait déjà eu lieu, et 50 mm d'enrobé bitumineux sur 50 mm de remblai sans retrait sont rencontrés plutôt que les 100 mm initialement prévus. De plus, le nouvel enrobé est compacté à l'aide d'une plaque vibrante plutôt qu'un rouleau conventionnel.

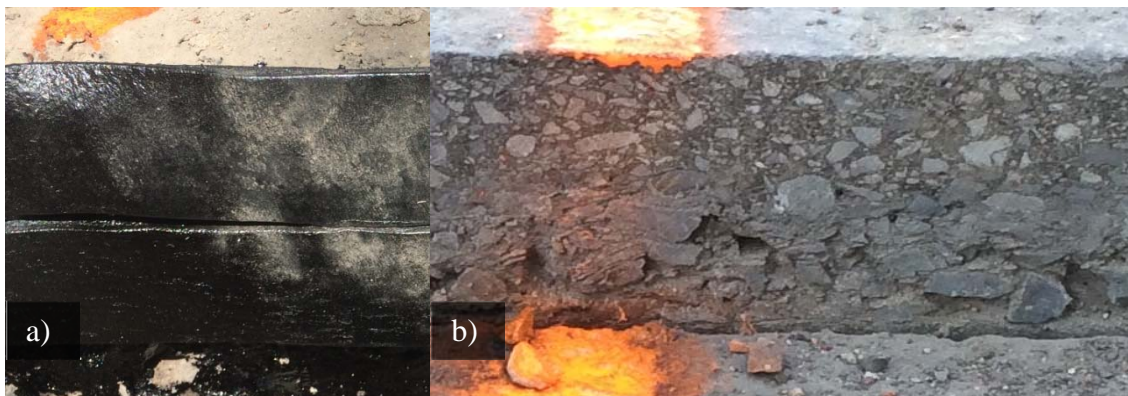


Figure 5 : a) Installation de 2 bandes bitumineuses de haut sur une coupe dans la chaussée et b) Détail de la chaussée du chantier #1, 50 mm d'enrobé sur 50 mm remblai sans retrait (échec)

L'installation se fait et un suivi sur l'aspect visuel des deux parties du joint (liant d'accrochage et bande bitumineuse) est possible, mais aucun échantillon n'est prélevé dans le cadre de ce projet.

3.2 Chantier #2

Le second chantier choisi pour effectuer l'échantillonnage pour les essais de laboratoire est situé en bordure de trottoir au coin sur la rue Sainte-Marguerite au nord de la rue Saint-Jacques (Figure 6). L'épaisseur d'enrobé est d'environ 100 mm d'ESG-10. La compaction se fait au petit rouleau par le contremaître (Figure 7). La couche du fond (50 mm) est compactée avec un madrier de 2'' par 10'' parce que l'équipement utilisé ne permet pas de compacter directement le fond d'une tranchée aussi étroite. Le marquage de peinture orange permet de localiser les échantillons de bande bitumineuse et ceux avec le liant d'accrochage communément appelé *colasse*.

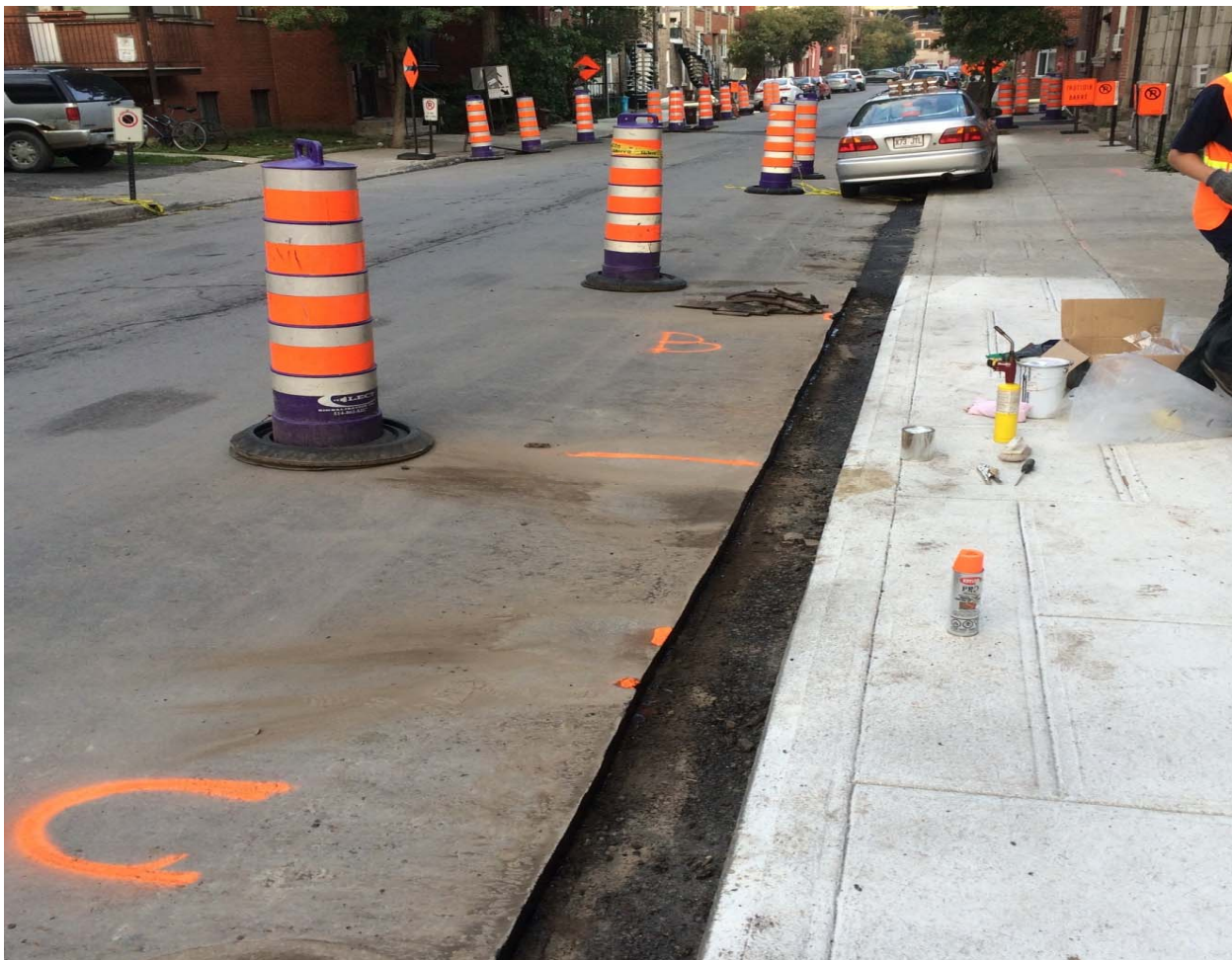


Figure 6 : Vue de la tranchée à l'étude

L'épaisseur de la deuxième couche est augmentée légèrement pour s'assurer de transférer toute l'énergie à la réparation plutôt qu'à la chaussée existante. L'enrobé chaud est compacté selon les règles de l'art par plusieurs passes consécutives du rouleau (Figure 7).



Figure 7 : Préparation de la couche finale et compaction graduelle au rouleau

Le carottage est réalisé par un technicien expérimenté, deux semaines après la réparation (Figure 8). Treize échantillons de 150 mm de diamètre sont prélevés dans chacune des deux parties de la tranchée, au centre du joint. Cette quantité d'échantillons devait permettre de réaliser le programme expérimental initial ainsi que de se constituer une réserve au cas où des bris se produiraient :

- 3+3 échantillons pour perméabilité transversale ;
- 3+3 échantillons pour perméabilité longitudinale ;
- 3+3 échantillons pour résistance à la traction à 20 °C.

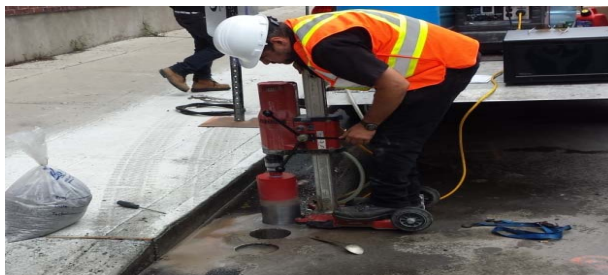


Figure 8 : Préparation des échantillons au centre du joint

Les éprouvettes de 50 mm de diamètre préparées perpendiculairement au joint de bande bitumineuse sont problématiques, car la texture caoutchouteuse de la bande provoque une force de cisaillement entre la partie du haut et celle du bas de l'échantillon lors du passage du carottier qui fait fissurer et décoller le joint (Figure 9). Environ un échantillon sur deux se brise avant même les essais. On peut supposer que ceux qui ayant résisté ont probablement eu une baisse de résistance. C'est une des raisons qui motive l'intégration d'éprouvettes rectangulaires, car la scie ne cause pas ce problème.



Figure 9 : Exemples de fissurations et décollements causés par le carottage (éprouvettes de 50 mm de diamètre)

3.3 Fabrication des systèmes de liaisonnement en laboratoire

Afin de reproduire le plus fidèlement possible les opérations de chantier, le processus de fabrication est le suivant :

Une première plaque de 500 mm X 180 mm X 100 mm d'enrobé de surface ESG-10 est fabriquée avec le compacteur de plaque puis sciée en deux dans le sens de la longueur (Figure 10). La bande bitumineuse est installée sur la surface verticale de la plaque d'enrobé sciée (Figure 11a). Le même principe est utilisé pour faire un joint transversal dans la plaque (Figure 11b) ainsi que pour faire les systèmes de liaisonnement qui utilisent le liant d'accrochage standard comme interface.



Figure 10 : Plaque d'enrobé sciée longitudinalement

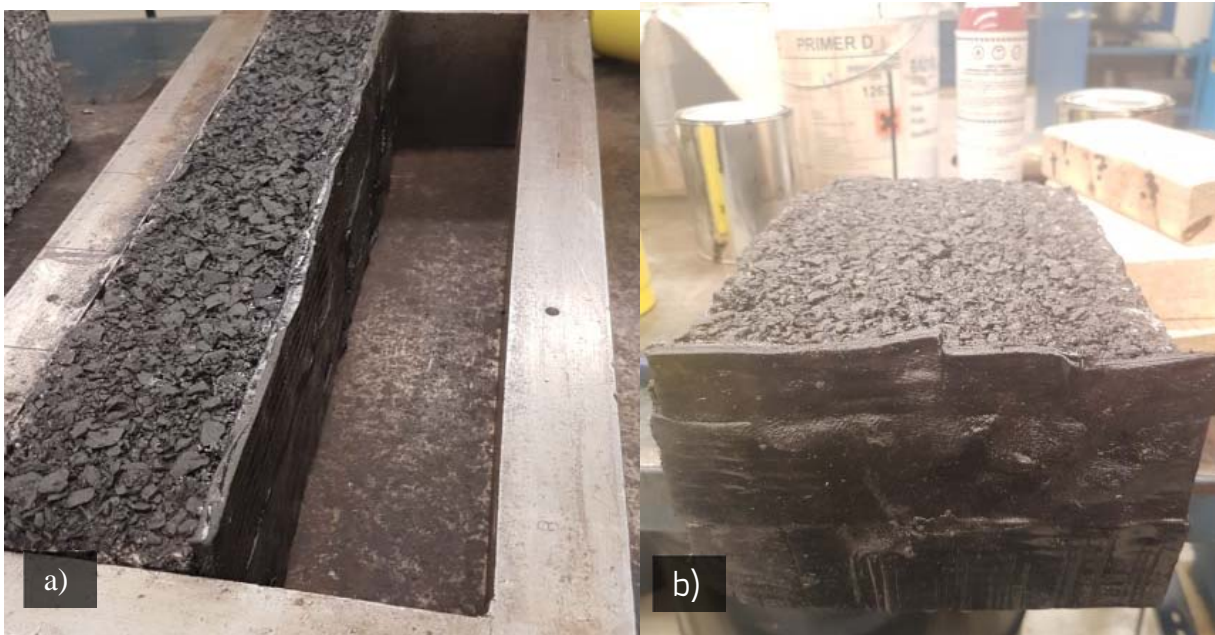


Figure 11 : a) Pose de la bande bitumineuse à la verticale (2017) longitudinalement et
b) Pose de la bande bitumineuse à la verticale (2017) transversalement

Au début, le moule est en position basse (Figure 12a) afin d'accueillir la masse d'enrobé à compacter. Des planches de contreplaqué sont ajoutées du côté existant afin de confiner l'enrobé vers la nouvelle moitié de plaque (Figure 12b et c).



Figure 12 : a) Plaque avec joint transversal en position basse dans le compacteur, b) Planches de bois pour confiner l'enrobé à compacter du bon côté du joint (transversal) et c) Planches de bois pour confiner l'enrobé à compacter du bon côté du joint (longitudinal)

Plus la procédure de compaction de plaque LC 26-400 avance, plus il faut enlever les planches de bois afin d'arriver à un niveau d'enrobé égal des deux côtés de la plaque (Figure 13). Cette méthode est utilisée tant avec des joints transversaux (Figure 13) que des joints longitudinaux (Figure 14).

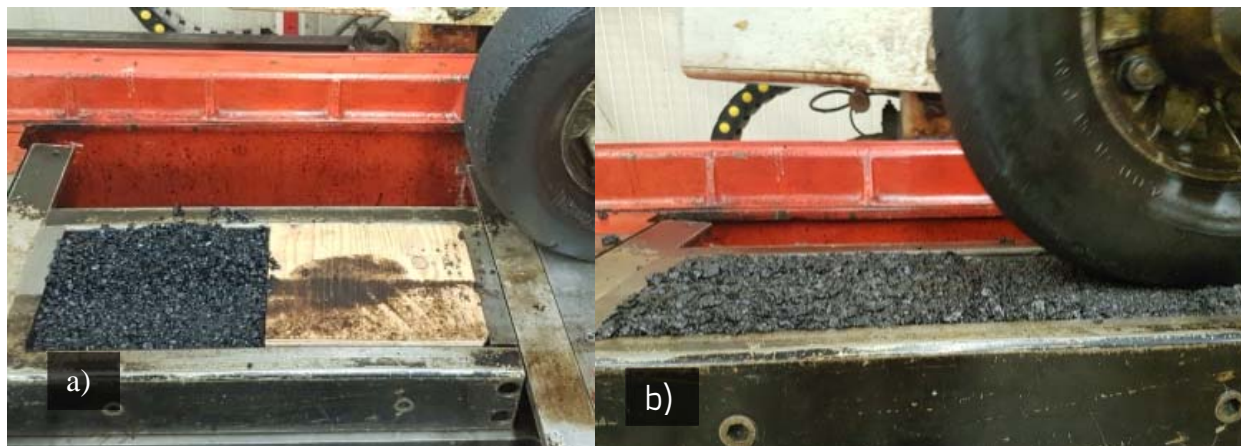


Figure 13 : a) Premières passes de compaction sur joint transversal et b) Dernières passes de compaction sur joint transversal

Cette méthode de compactage, effectuée en laboratoire, permet de compacter la réparation d'une façon qui semble reproduire fidèlement ce qui est observé au chantier lorsque le rouleau est utilisé. Le fabricant recommande de faire dépasser la bande bitumineuse de 5 mm de la surface du pavage pour ainsi créer un bourrelet qui vient étanchéiser parfaitement le joint de surface. Il est facilement visible sur la Figure 14a.

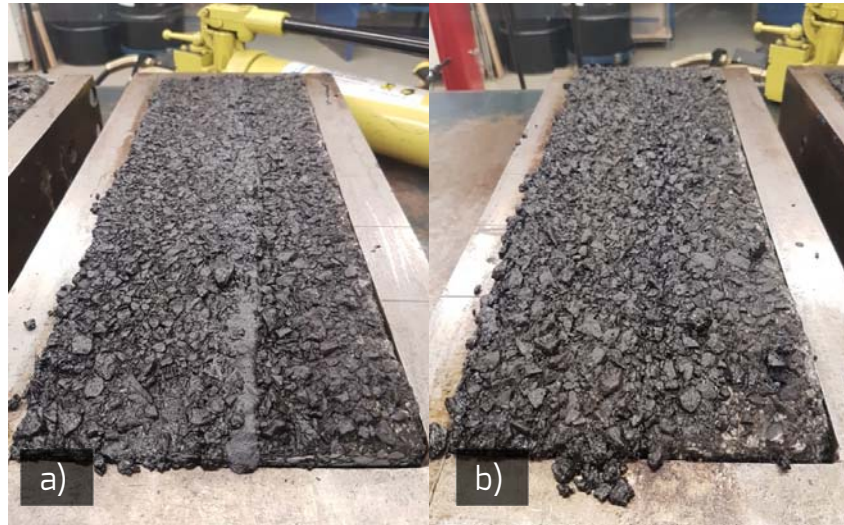


Figure 14 : a) Bourrelet visible à la surface d'une plaque réparée avec un joint longitudinal de bande bitumineuse et b) Plaque avec joint longitudinal de colasse

Dans le cadre de ce rapport, les plaques avec joints longitudinaux sont fabriquées avec de l'enrobé de surface qui est compacté d'un côté à 5 % de vides et de l'autre à 10 % afin de simuler une réparation moins bien compactée. La figure 15 (a et b) permet d'observer la quantité de vides dans les mélanges. Il est visible que le côté compacté à 10 % contient plus de vides que celui compacté à 5 %. Les plaques avec joints transversaux pour essais d'orniérage et de flexion sont fabriquées à 5 % de vides après compactage.

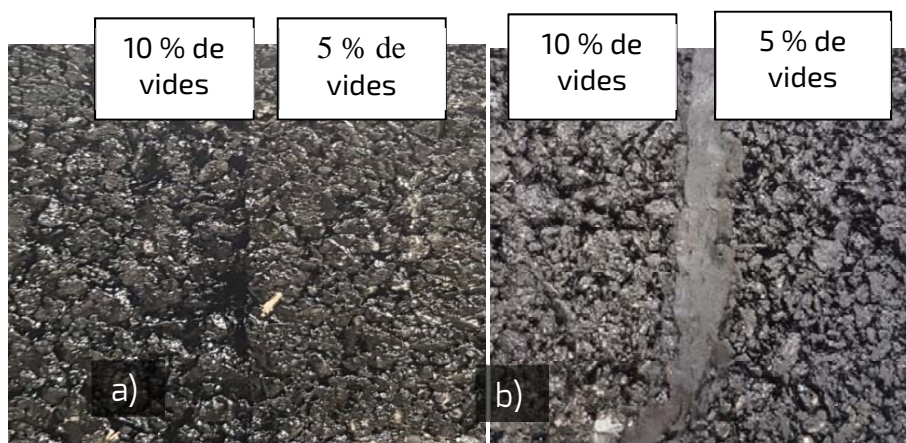


Figure 15 : a) Joint dans la plaque avec liant d'accrochage standard (côté du moule) et b) Joint dans la plaque avec bande bitumineuse (côté du moule)

3.4 Fabrication des poutres pour essai de flexion

Les échantillons pour les essais de flexion sont de forme rectangulaire de 40 x 40 x 160 mm, découpés à la scie à eau avec un gabarit en aluminium. Le sciage est rapide et ne semble pas interférer avec la texture caoutchouteuse des joints bitumineux comme observé avec le carottier (Figure 9). Ce procédé permet de faire beaucoup plus d'échantillons avec le même joint et minimise les pertes.

Les échantillons sont découpés toujours dans le même ordre (Figure 16), car le pourcentage de vides peut varier dans la plaque en fonction de la position. L'énergie de compaction n'est pas homogène à 100 % à cause de l'effet de paroi du moule et les tassements lors de l'essai d'orniérage peuvent faire varier les propriétés du système de liaisonnement.

Des échantillons témoins sont aussi fabriqués pour vérifier la résistance d'une poutre d'enrobé sans joint. L'échantillonnage sur une plaque avec joint transversal peut facilement être jumelé avec des échantillons standards cylindriques grâce à la longueur du joint de 50 cm (Figure 17).

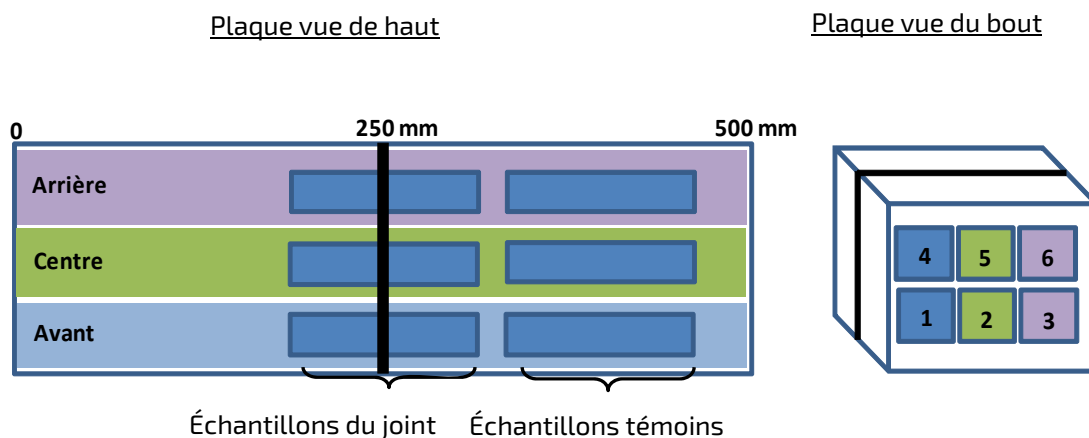


Figure 16 : Position et numérotation des échantillons taillés dans une plaque d'enrobé avec joint transversal

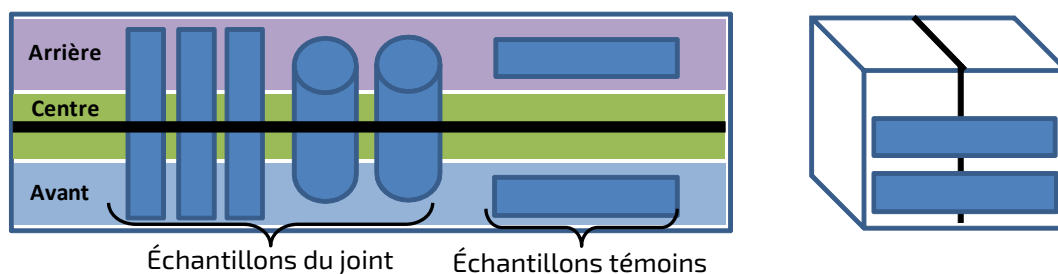


Figure 17 : Position des échantillons taillés dans une plaque d'enrobé avec joint longitudinal

La Figure 18 montre les éprouvettes fraîchement taillées. Chaque éprouvette est mesurée avec un vernier avant l'essai de flexion et l'incertitude moyenne calculée est de ± 1 mm.

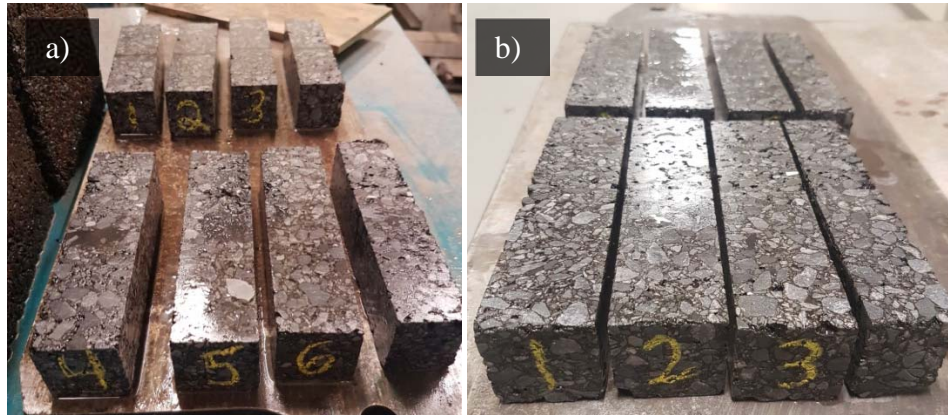


Figure 18 : a) Poutre du joint de bande bitumineuse orniérée et
b) Poutre du joint avec liant d'accrochage orniérée

4. ESSAIS EN LABORATOIRE

Les essais réalisés en laboratoire dans le cadre de cette étude ne sont pas normalisés et ne couvrent pas tous les aspects du comportement d'un joint de liaisonnement sous contrainte. Par ces essais, l'étude tente de reproduire les facteurs majeurs influençant la performance du joint. Les essais de perméabilité sur des échantillons d'enrobé bitumineux jointés veulent comparer l'étanchéité du système avec liant d'accrochage et celle du système avec bande bitumeuse. L'essai de traction directe représente la traction subie par le système, due au retrait thermique de l'enrobé bitumineux avec la diminution de la température. L'essai de flexion représente plutôt les efforts dus au passage de véhicules ou aux mouvements de la fondation de chaussée. L'essai d'orniéreur simule le passage des véhicules et son impact sur les systèmes de liaisonnement.

4.1 Perméabilité

L'essai de perméabilité réalisé dans le cadre de ce projet est non standard. L'écoulement de l'eau à travers l'échantillon est réalisé sous vide afin d'accélérer le déroulement de l'essai. Cet essai ne permet pas d'établir la perméabilité réelle du matériau, mais bien de comparer l'étanchéité de chacun des systèmes de liaisonnement.

Le montage de perméabilité eau-vacuum est présenté à la Figure 19. L'échantillon est placé à l'intérieur d'une cellule étanche, enveloppé par une gaine en latex scellée avec du lubrifiant à vacuum et des élastiques. Une pression négative de 100 kPa est exercée au bas de l'échantillon et le dessus de l'échantillon est alimenté en eau par une burette de 100 ml. Une pression cellulaire de confinement de 140 kPa est exercée pour éviter le cheminement d'eau à la surface de l'échantillon.

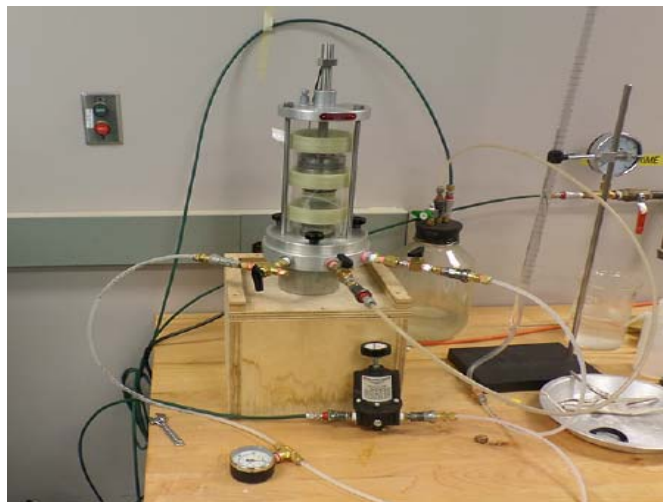


Figure 19 : Montage de perméabilité eau-vacuum

Deux séries d'essais de perméabilité sont réalisées. Une première série avec les joints de liaisonnement placés horizontalement afin d'évaluer l'écoulement à travers le joint. Une seconde série est réalisée avec le joint placé verticalement afin d'évaluer l'écoulement dans l'enrobé bitumineux le long du joint.

Le temps nécessaire au passage de 100 ml d'eau à travers chaque échantillon est noté. L'essai d'écoulement est réalisé plusieurs fois pour un même échantillon et la moyenne des résultats est considérée. Le débit est ensuite calculé en [ml/s] puis en coefficient de perméabilité K en [m/s] à l'aide des dimensions de l'échantillon. La pression d'écoulement est considérée constante.

La formule de perméabilité utilisée est la suivante :

$$K = \frac{Q * l}{\Delta h * A * t}$$

Avec :

- Q : le débit en litres par seconde
- l : la longueur de l'échantillon en mètres
- Δh : la pression d'eau en mètres
- A : la section de l'échantillon en mètres
- t : le temps en secondes

Il faut noter que le montage de perméabilité vacuum-eau est sensible aux fuites et aux blocages, soit par une bulle d'air ou par des particules de sol ou de graisse. Il faut être très attentif, car ces sources d'erreurs peuvent causer de grandes variations dans les résultats. Le protocole pour l'essai de perméabilité est ajusté afin d'inclure entre chaque essai une purge des tuyaux, l'utilisation d'eau désaérée ainsi que la contre-vérification des éprouvettes lors d'une période ultérieure de test.

4.2 Traction (arrachement)

L'essai de traction consiste à tirer sur l'éprouvette jusqu'à la rupture. La force nécessaire à la rupture est mesurée. L'éprouvette est fixée aux mâchoires d'une presse qui travaille en traction. Des casques d'aluminium sont installés sur les échantillons cylindriques de 50 mm de diamètre avec de la résine époxy (Figure 20) de manière à fixer l'éprouvette sur la presse. L'essai d'arrachement est réalisé à vitesse constante de 0,1 mm/min.

Certaines éprouvettes sont arrêtées après 2,5 mm de déplacement alors que d'autres sont sollicitées jusqu'à la rupture complète. Parfois la rupture se produit dans l'enrobé plutôt que dans le joint.



Figure 20 : Échantillon de bande bitumineuse dans la presse MTS

4.3 Orniérage

Un essai d'orniérage avec joint transversal s'est ajouté au programme pour comparer le comportement des deux matériaux de réparation à l'étude.

L'objectif de l'essai d'orniérage est d'évaluer la stabilité des systèmes de liaisonnement, ainsi que l'effet du compactage sur le joint. Cet essai consiste à faire passer à répétition sur une plaque d'enrobé bitumineux une roue de référence chargée afin de produire des déformations qui sont mesurées par la suite. L'essai se déroule dans une enceinte à température contrôlée et maintenue à 60 °C.

Des critères de performance existent en fonction du nombre de cycles de chargement réalisés. La réalisation d'essais sur une plaque jointée n'est pas normalisée, les résultats sont donc comparés entre eux, non pas aux critères de performance.

Les systèmes de liaisonnement sont placés dans le compacteur de plaque comme des plaques d'enrobé conventionnelles (Figure 21).



Figure 21 : Plaque d'enrobé de surface dans l'orniéreur

L'essai débute après un temps de conditionnement de 12 heures. Des mesures de la surface sont prises avant et en cours d'essai au moyen d'un gabarit qui permet de localiser précisément 15 emplacements situés selon trois axes à la surface de la plaque, l'axe arrière, du centre et de

l'avant (Figure 22). La déformation est mesurée à 1000, 3000, 10 000 et 30 000 cycles de passages de la roue de référence.

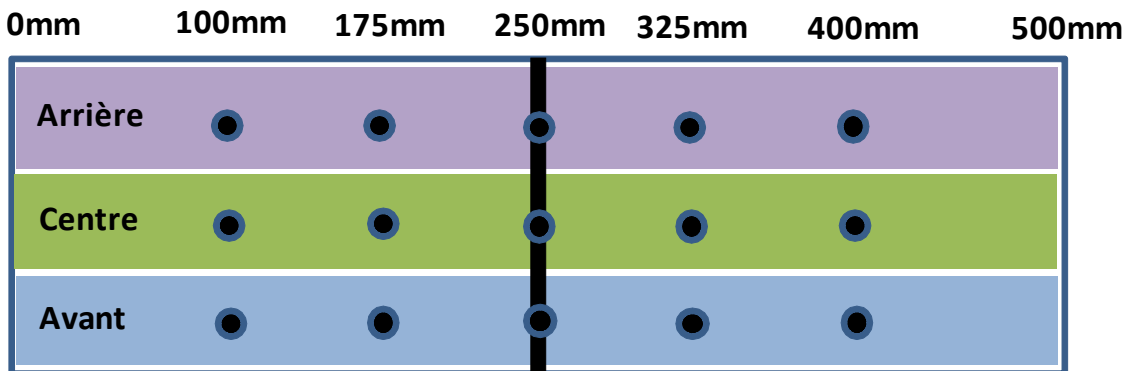


Figure 22 : Position des mesures d'affaissement sur un système avec joint transversal

Les plaques sont ensuite découpées telles qu'illustrées à la Figure 16 afin de réaliser des essais de résistance à la flexion. Des éprouvettes témoins (sans joint) sont aussi fabriquées.

4.4 Flexion

L'essai de flexion réalisé est adapté de la norme ASTM C348-97 *Flexural strength of Hydraulic-Cement Mortars*. Cette norme évalue la résistance à la flexion d'un mortier par l'application d'une force verticale sur une éprouvette en forme de poutre simplement appuyée. C'est à la suite de l'observation de l'interférence entre le carottier et la membrane bitumineuse (Figure 9) ainsi que pour compléter les résultats de l'essai d'arrachement que cet essai de flexion est réalisé. Les 24 éprouvettes testées proviennent de plaques sollicitées à l'ornièreur et non sollicitées.

L'essai est réalisé à température ambiante (23 °C) sur des échantillons taillés à la scie. .

Les échantillons rectangulaires sont moins homogènes que des échantillons parfaitement ronds. Or, les plaques d'enrobé ne sont pas non plus homogènes à cause notamment de l'effet paroi du moule. Il est donc intéressant d'utiliser les poutres comme éprouvettes, car elles minimisent les pertes, ce qui permet de faire de trois à quatre fois plus d'éprouvettes avec la même plaque.

La calibration du nouveau montage s'effectue selon les règles de l'art et la répétabilité des essais peut être validée. Presque toutes les 24 éprouvettes ont un comportement cohérent et leurs résultats sont retenus.

Les appuis du bas sont à une distance de 120 mm et l'appui du haut est double et centré sur le joint avec 40 mm d'espacement (Figure 23). La presse et le logiciel d'acquisition sont de la compagnie Pasco et la vitesse d'application de force est de 4 à 6 mm/min.

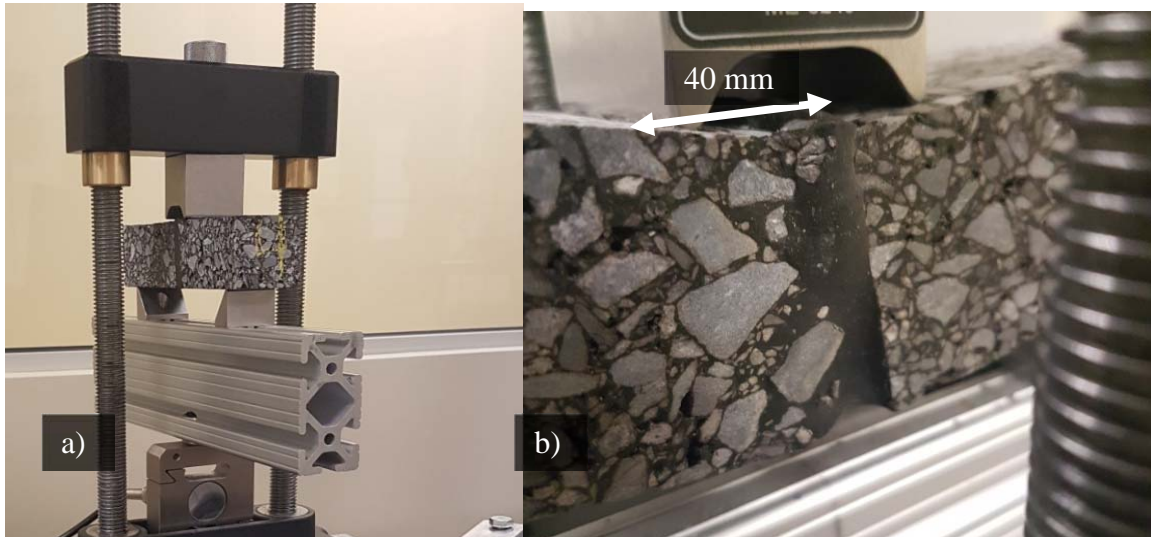


Figure 23 : a) Vue globale du montage pour essai de flexion sur éprouvettes poutres et
b) Appui double supérieur centré sur un joint de bande bitumineuse

4.5 Programme d'essais

Le Tableau I présente le programme d'essais réalisé dans le cadre de cette phase de l'étude. Il distingue la provenance et le nombre d'échantillons utilisés pour les essais de perméabilité, traction, orniérage et flexion.

Tableau I : Programme d'essais

		Liant d'accrochage	Bande bitumineuse	Témoin
Échantillons provenant du chantier	Perméabilité sur joints	6	6	
	Traction sur joints	3	3	
	Traction sur éprouvettes ayant servi à la perméabilité	3	3	
Échantillons fabriqués en laboratoire	Perméabilité sur joints	4	4	4
	Traction sur joints	2	2	
	Flexion sur joints	4	2	
	Orniérage	1	1	
	Flexion sur joints sollicités à l'orniéreur	6	6	6

5. RÉSULTATS ET ANALYSE

5.1 Perméabilité

Les essais de perméabilité sont réalisés sur les échantillons prélevés au chantier et sur les nouveaux échantillons fabriqués au laboratoire. Des échantillons témoins d'enrobés avec 5 et 10 % de vides permettent de comparer la perméabilité des systèmes de liaisonnement à l'étude. Figure 24 montre les perméabilités moyennes des 33 éprouvettes testées. La perméabilité des échantillons de bande bitumineuse horizontale n'est pas illustrée, car ils sont tous imperméables. Un enrobé avec 5 % de vides est environ 8 fois moins perméable qu'un enrobé contenant 10 % de vides.

Les données utilisées à la Figure 24 proviennent du Tableau II et du Tableau III se retrouvant aux pages suivantes.

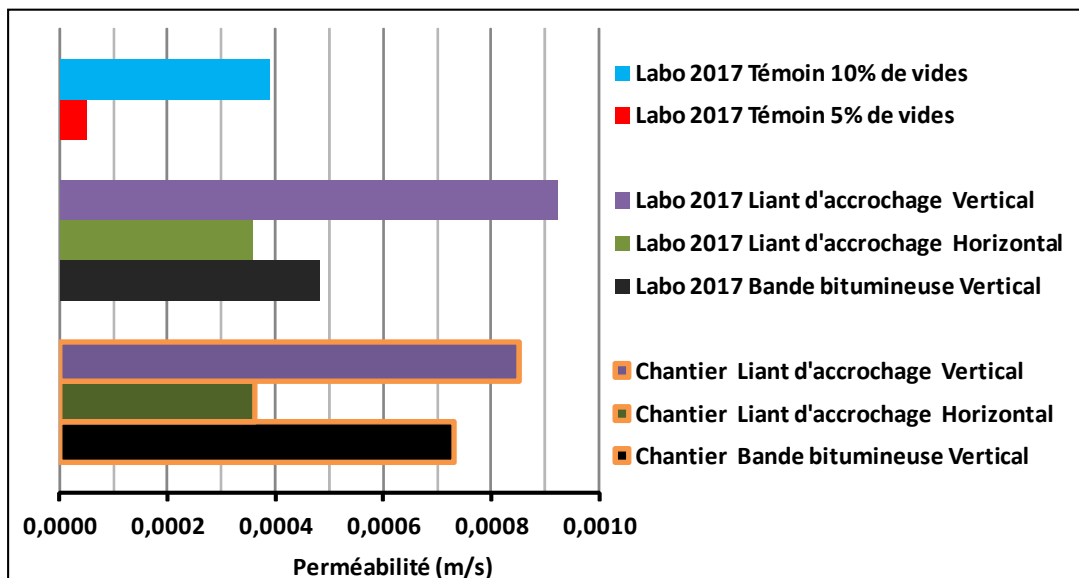


Figure 24 : Perméabilité moyenne des éprouvettes de laboratoire et de chantier

Il existe une bonne corrélation entre la perméabilité des systèmes fabriqués en laboratoire et ceux issus du chantier. D'après les résultats obtenus, les commentaires suivants peuvent être émis :

- L'écoulement horizontal est impossible à travers le système avec bande bitumineuse ;
- L'écoulement horizontal est possible à travers le système avec liant d'accrochage et est du même ordre de grandeur que l'enrobé bitumineux témoin avec 10 % de vides ;

- L'écoulement vertical est possible dans le système avec bande bitumineuse, car l'eau coule de chaque côté du joint, ce qui explique que la perméabilité est du même ordre de grandeur que l'enrobé bitumineux témoin à 10 % de vides ;
- L'écoulement vertical est possible à travers le système avec liant d'accrochage et est deux fois plus important que l'enrobé bitumineux témoin avec 10 % de vides.

Ces résultats suggèrent que le sciage d'un enrobé ainsi que l'utilisation d'un matériau de réparation à base de liant d'accrochage pour réaliser la réparation de la chaussée créent un chemin vertical préférentiel pour l'eau vers l'infrastructure.

Tableau II : Résumé de tous les essais de perméabilité (moyenne des essais réalisés)

Provenance de l'échantillon	Type d'échantillon	Détails	Perméabilité K (m/s)
Chantier	Bande bitumineuse	Horizontal	Imperméable
Chantier	Bande bitumineuse	Vertical	7,30E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Horizontal	3,63E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	8,53E-04
Labo 2017	Bande bitumineuse	Horizontal	Imperméable
Labo 2017	Bande bitumineuse	Vertical	4,82E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Horizontal	3,58E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Vertical	9,23E-04
Labo 2017	Témoin	5% de vides	4,99E-05
Labo 2017	Témoin	10% de vides	3,90E-04

Tableau III : Résultats complets (2017) de perméabilité des échantillons à une succion de 100 kPa

Provenance de l'échantillon	Type d'échantillon	Détails	#	Temps pour 100ml (secondes)	Débit (ml/s)	Débit (l/s)	Perméabilité K (m/s)
Chantier	Bande bitumineuse	Horizontal	5	99999999	0,00	1,00E-10	9,99E-17
Chantier	Bande bitumineuse	Horizontal	6	99999999	0,00	1,00E-10	9,99E-17
Chantier	Bande bitumineuse	Horizontal	1	99999999	0,00	1,00E-10	9,99E-17
Chantier	Bande bitumineuse	Vertical	7	418	0,24	2,39E-04	5,72E-04
Chantier	Bande bitumineuse	Vertical	9.1	440	0,23	2,27E-04	5,16E-04
Chantier	Bande bitumineuse	Vertical	9.2	301	0,33	3,32E-04	1,10E-03
Chantier	Liant d'accrochage	Horizontal	6	427	0,23	2,34E-04	5,49E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Horizontal	3	582	0,17	1,72E-04	2,96E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Horizontal	4	548	0,18	1,83E-04	3,33E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Horizontal	6	605	0,17	1,65E-04	2,73E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	10.1	434	0,23	2,30E-04	5,31E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	10.2	395	0,25	2,53E-04	6,40E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	10.2	295	0,34	3,40E-04	1,15E-03
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	8.1	428	0,23	2,34E-04	5,46E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	8.2	385	0,26	2,60E-04	6,73E-04
Chantier	Liant d'accrochage	Vertical	10.1	252	0,40	3,97E-04	1,57E-03
Labo 2017	Bande bitumineuse	Horizontal	A	99999999	0,00	0,00E+00	0,00E+00
Labo 2017	Bande bitumineuse	Horizontal	C	99999999	0,00	0,00E+00	0,00E+00
Labo 2017	Bande bitumineuse	Vertical	E1	503	0,20	1,99E-04	3,95E-04
Labo 2017	Bande bitumineuse	Vertical	E2	348	0,29	2,87E-04	8,25E-04
Labo 2017	Bande bitumineuse	Vertical	E3	663	0,15	1,51E-04	2,27E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Horizontal	C	858	0,12	1,17E-04	1,36E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Horizontal	A	415	0,24	2,41E-04	5,80E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Vertical	CE1	345	0,29	2,90E-04	8,40E-04
Labo 2017	Liant d'accrochage	Vertical	CE2	315	0,32	3,17E-04	1,01E-03
Labo 2017	Témoin	5% de vides	CB1	1032	0,10	9,69E-05	9,38E-05
Labo 2017	Témoin	5% de vides	AB1	2130	0,05	4,69E-05	2,20E-05
Labo 2017	Témoin	5% de vides	C1	3652	0,03	2,74E-05	7,49E-06
Labo 2017	Témoin	5% de vides	A1	1145	0,09	8,73E-05	7,62E-05
Labo 2017	Témoin	10% de vides	CB2	475	0,21	2,11E-04	4,43E-04
Labo 2017	Témoin	10% de vides	AB2	605	0,17	1,65E-04	2,73E-04
Labo 2017	Témoin	10% de vides	C2	535	0,19	1,87E-04	3,49E-04
Labo 2017	Témoin	10% de vides	A2	450	0,22	2,22E-04	4,93E-04

5.2 Traction (arrachement)

Les essais de traction réalisés sur les échantillons prélevés au chantier ne permettent pas d'apprécier la rupture des matériaux (Figure 25), car la presse s'arrête avant. Lors de la première étude, la rupture se produisait dans tous les cas dans l'enrobé avant 2,5 mm et ces mêmes paramètres ont été utilisés à tort pour programmer l'équipement.

Les commentaires suivants peuvent quand même être formulés :

- La force des systèmes avec liant d'accrochage (série C) décroît après avoir atteint un maximum situé entre 0,5 et 1,5 mm de déplacement ;
- Le comportement des trois échantillons de système avec bande bitumineuse est homogène, ductile et la pente des courbes permet de prédire des forces maximales à la rupture supérieures à celles de la série C.

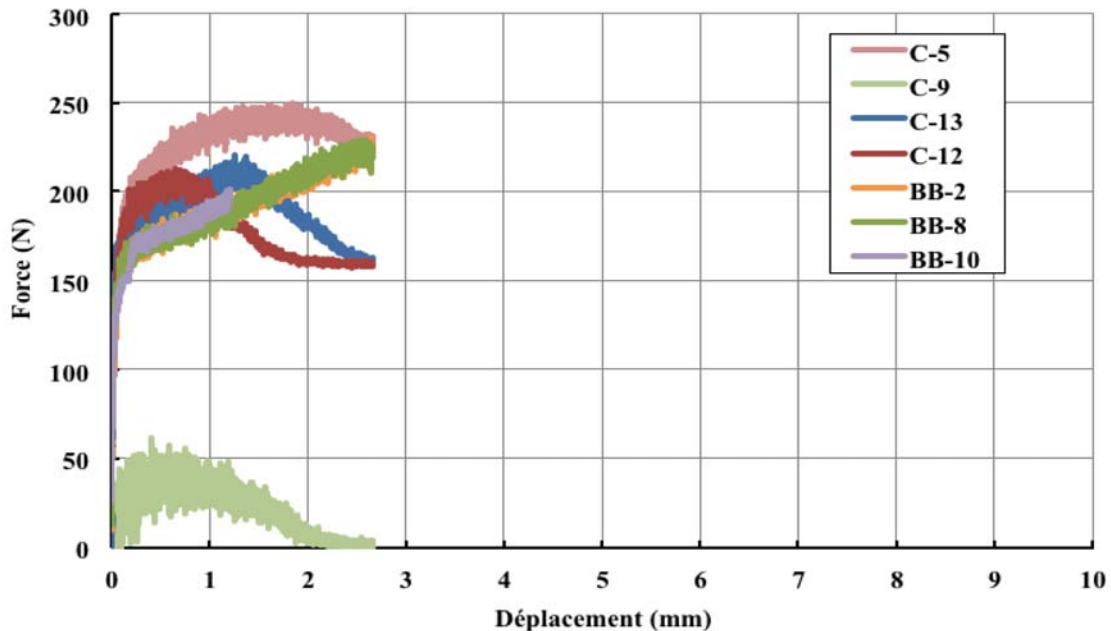


Figure 25 : Graphique d'arrachement des échantillons intacts prélevés au chantier

La presse est reprogrammée pour permettre que la rupture des échantillons fabriqués en laboratoire se produise à coup sûr.

La Figure 26 (a et b) illustre la ductilité des systèmes avec bande bitumineuse. Lorsque le joint en bande bitumineuse cède, il est possible de le recoller avec une force de quelques dizaines de newtons et ainsi garder un contact durable entre les deux surfaces (Figure 26c).

Le joint de bande bitumineuse est probablement meilleur en fatigue que les produits d'émulsion. Par contre, les données récoltées lors de ce projet ne permettent pas de quantifier cette propriété.

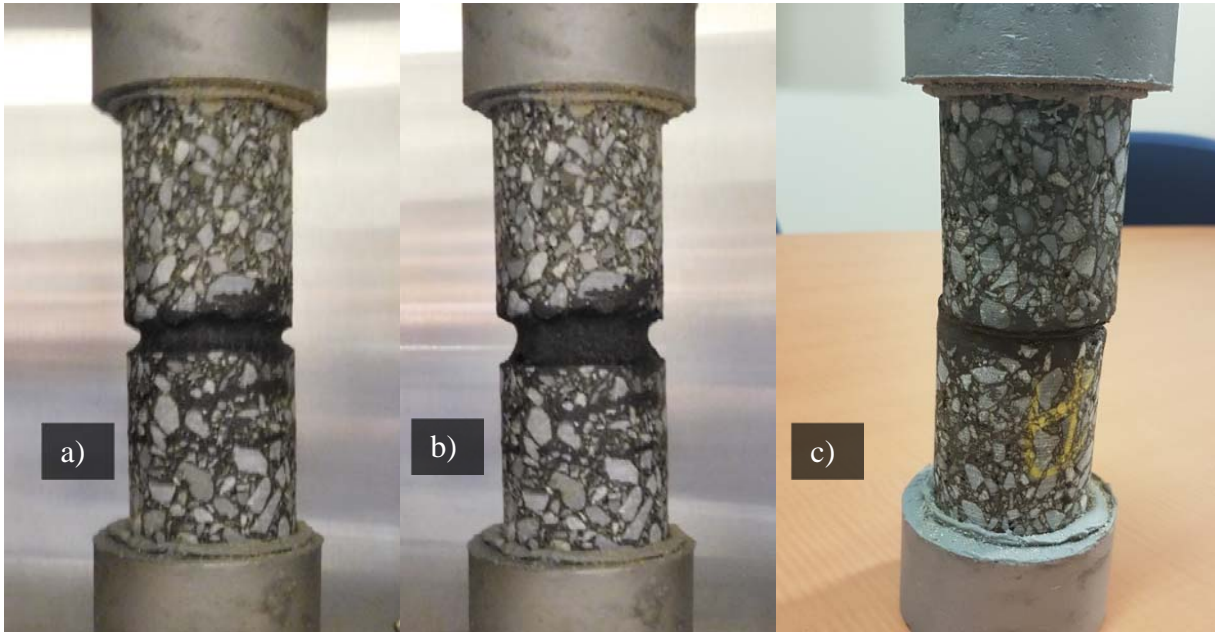


Figure 26 : a) et b) Comportement ductile d'une éprouvette de bande bitumineuse lors de la traction et c) Éprouvette de bande bitumineuse rompue et recollée

Les systèmes avec liant d'accrochage étant fragiles, un des échantillons se brise en l'installant sur la presse avant de lancer l'acquisition des données.

La Figure 27 présente les courbes de force et déplacement obtenues par les échantillons de laboratoire. Deux échantillons avec bande bitumineuse et deux avec liant d'accrochage sont testés. La force atteinte par la bande bitumineuse avoisine les 200 N alors que l'éprouvette avec liant d'accrochage n'est que de ± 25 N. Aucune donnée n'est disponible pour l'échantillon C5, car l'éprouvette se brise avant le début de l'essai. La grande ductilité de la bande bitumineuse est facile à observer sur ce graphique.

La différence entre l'amplitude de la force et la forme de la courbe des Figure 25 et Figure 27 s'explique par la provenance des échantillons (chantier versus laboratoire). Les techniques de compactage, le pourcentage de vides, les caractéristiques des enrobés bitumineux utilisés ainsi que la température des mélanges employés pourraient expliquer ces différences.

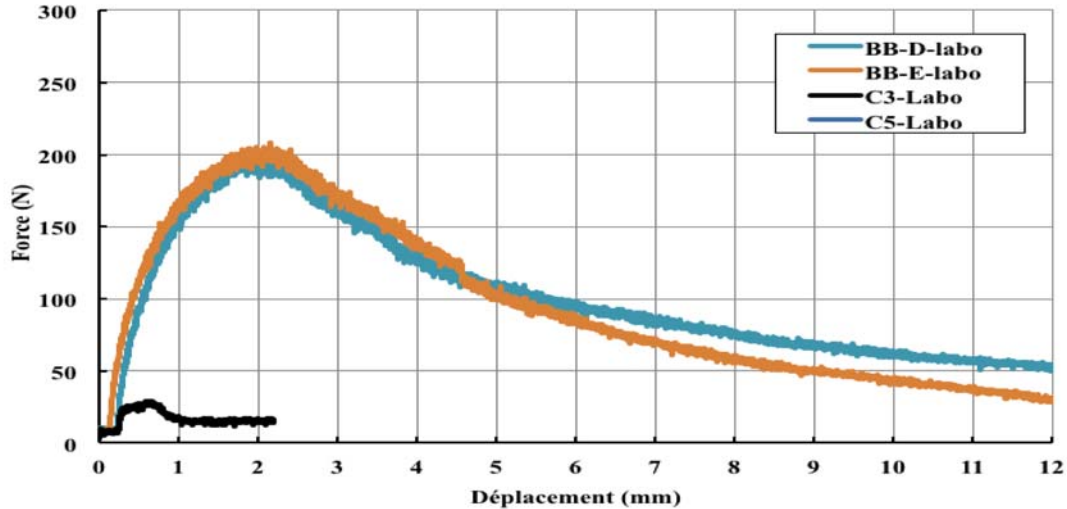


Figure 27 : Graphique d'arrachement des éprouvettes fabriquées au laboratoire

Ces éprouvettes qui sont fabriquées en laboratoire ont, d'un côté du joint, 5 % de vides et de l'autre, 10 % de vides. Les résultats de la Figure 27 suggèrent que la performance d'un système avec liant d'accrochage est fortement diminuée lorsque l'enrobé bitumineux contient beaucoup de vides, alors que la bande bitumineuse performe bien quand même.

Des essais de traction supplémentaires sont réalisés sur les échantillons ayant préalablement subi les essais de perméabilité. La Figure 28 présente les résultats obtenus avec les échantillons prélevés au chantier. On constate une montée rapide de la force et une rupture rapide des échantillons de la série C (liant d'accrochage) alors que la série BB (bande bitumineuse) a une meilleure déformation avant la baisse de la force et la rupture.

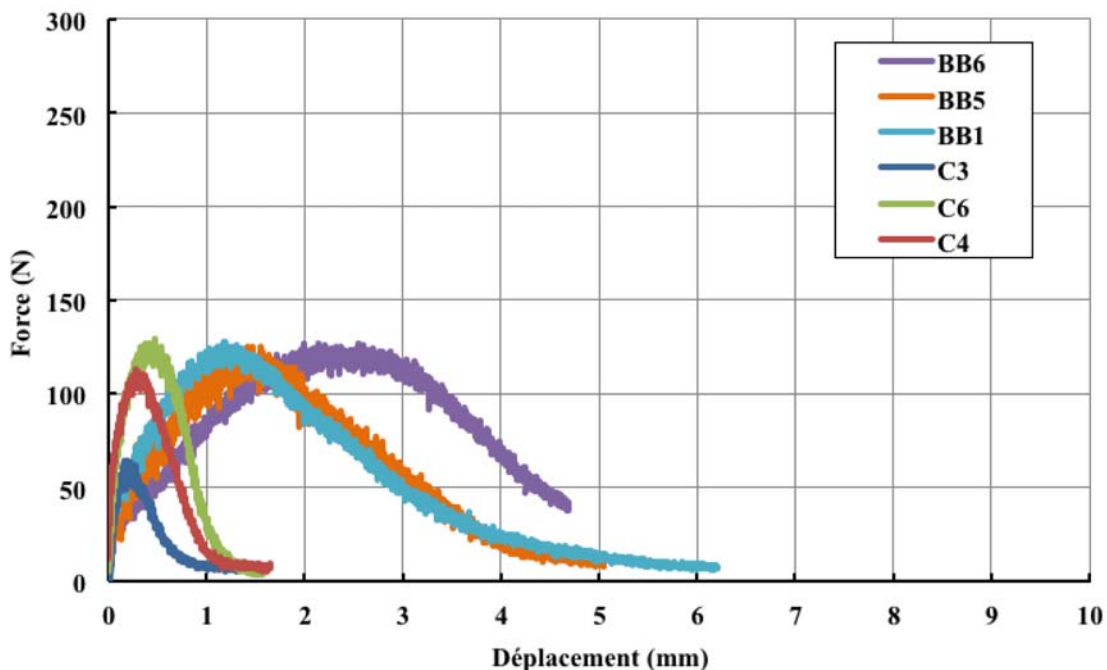


Figure 28 : Graphique d'arrachement des éprouvettes chantier utilisées pour la perméabilité

Lors de ces essais, les échantillons de bande bitumineuse se brisent dans l'enrobé bitumineux plutôt que dans le joint (Figure 29), alors que ceux avec liant d'accrochage se brisent en plein centre du joint. Le fait que la rupture se produise dans l'enrobé bitumineux indique que le joint est plus résistant. Donc, la force nécessaire à la rupture d'un joint de bande bitumineuse est plus grande que 125 N.



Figure 29 : Éprouvettes BB6, BB5 et BB1 avec bande bitumineuse toutes rupturées dans l'enrobé

Les écarts d'amplitude observés entre la Figure 27 et la Figure 28 sont principalement dus au fait que les échantillons utilisés avaient servi préalablement aux essais de perméabilité. Le fait

d'exposer intensément un enrobé bitumineux à l'eau diminue l'adhérence entre le bitume et les granulats et donc, crée des faiblesses. Il est probable que si la rupture ne s'était pas produite dans l'enrobé bitumineux, la force maximale et la ductilité des échantillons auraient été semblables aux échantillons intacts fabriqués en laboratoire (Figure 27).

5.3 Comportement des systèmes à l'orniérage

Les plaques testées à l'orniéreur semblent montrer qu'un système avec bande bitumineuse a plus tendance à se déformer qu'un système avec liant d'accrochage (Figure 30). Avec la chaleur et l'énergie, les granulats s'incrudent dans la bande bitumineuse et provoquent le ramollissement du joint ainsi qu'un léger tassement.

La figure montrée à l'Annexe 1 regroupe un graphique pour chaque axe (avant, central et arrière) et pour chaque plaque (liant d'accrochage et bande bitumineuse). L'affaissement de chaque point repère (Figure 22) en fonction du nombre de cycles est présenté.

L'affaissement du joint de bande bitumineuse est environ 50 % supérieur au joint avec liant d'accrochage (9,7 mm versus 6,5 mm) à 30 000 cycles.



Figure 30 : Comparaison de l'affaissement pour chacun des systèmes de liaisonnement orniérés (30 000 cycles)

5.4 Performance à la flexion

Les résultats des essais de flexion des échantillons non sollicités et sollicités par l'orniéreur sont présentés dans cette section. Il s'agit des essais non sollicités avec les systèmes de liant d'accrochage et de bande bitumineuse, dans un premier temps, et ensuite des résultats des essais sollicités pour l'enrobé témoin, le système de liant d'accrochage et celui de bande bitumineuse.

5.4.1 Systèmes non sollicités

La Figure 31 montre les résultats d'essais obtenus pour le liant d'accrochage et la bande bitumineuse. Les quatre échantillons avec liant d'accrochage se brisent tous à moins d'un millimètre de déflexion avec une force moyenne de 175 N. La rupture se produit en plein centre du joint dans tous les cas (Figure 32 (a et b)).

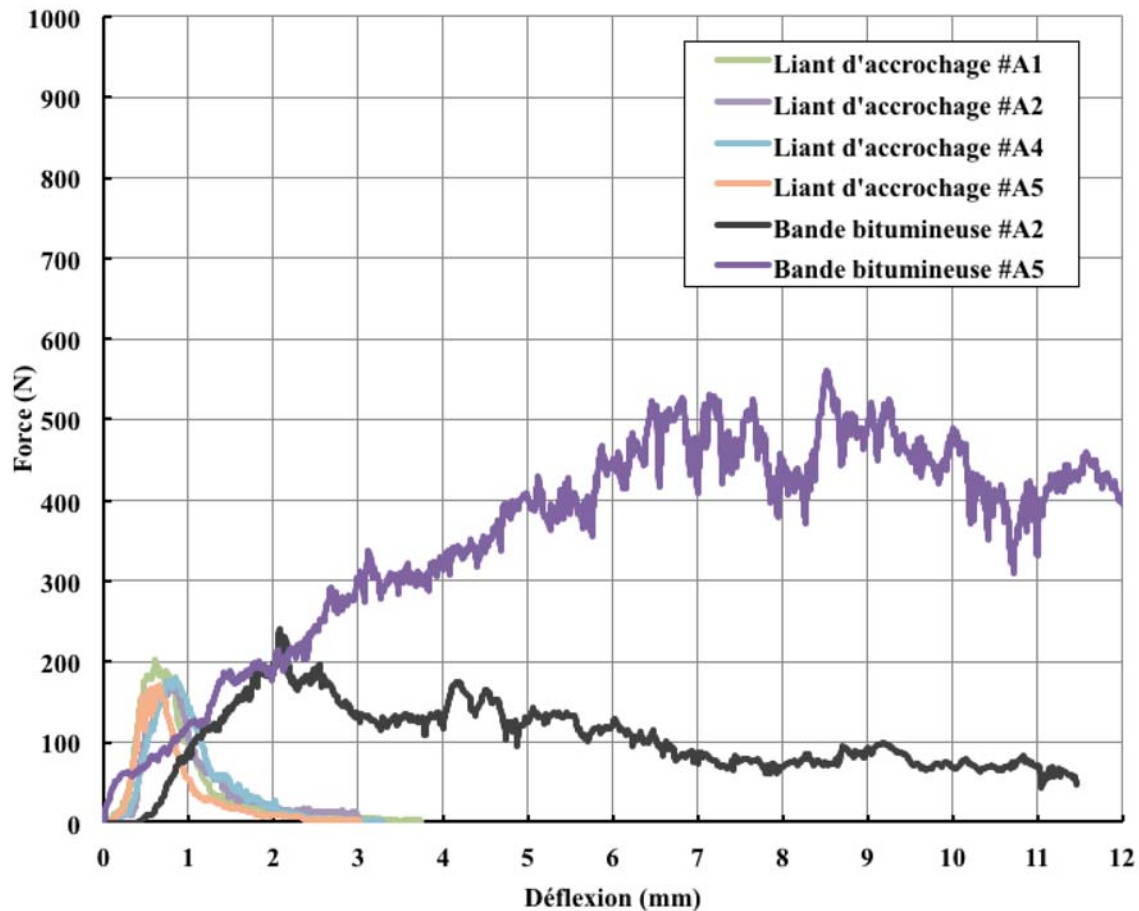


Figure 31 : Résultats de flexion des éprouvettes intactes de colasse (liant d'accrochage) et de bande bitumineuse

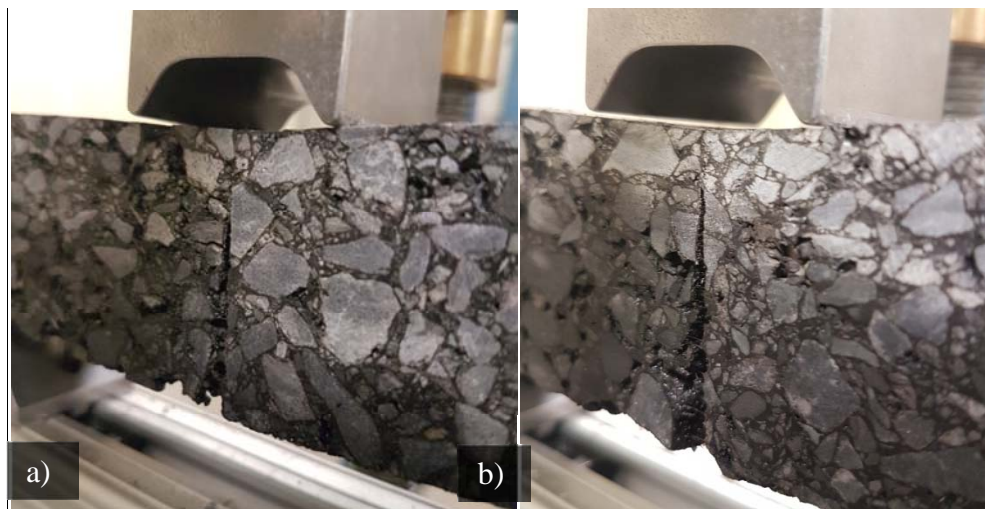


Figure 32 : a) Fissuration de l'éprouvette liant d'accrochage #A4 au centre du joint et
b) Fissuration de l'éprouvette liant d'accrochage #A5 au centre du joint

Toujours à la Figure 32, les deux échantillons avec bande bitumineuse testés atteignent des forces de 240 N et 560 N pour une déflexion ductile de plus de 10 mm avant l'arrêt de l'essai. En effet, avec ce déplacement on atteint la limite de l'appareil. Il n'y a pas de rupture proprement dite, mais plutôt un décollement de la bande bitumineuse de la surface sciée de l'enrobé simultanément à la déformation de cette dernière (Figure 33b et Figure 34b). Une différence marquée est visible entre les deux échantillons de bande bitumineuse.

L'analyse des courbes des échantillons #A2 et #A5 montre que pour la courbe #A2 il y a chute de la force résiduelle après une déflexion de 2 mm correspondant au début du décollement (Figure 33b). La courbe de l'échantillon #A5 indique plutôt une augmentation de cette force jusqu'à un plateau relativement constant, et ce, malgré le décollement. Le lien entre ces comportements et la position de l'échantillon dans la plaque (Figure 16) peut être fait. En effet, l'échantillon de bande bitumineuse #A2 est issu du bas de la plaque. Son indice de vides est donc plus grand que celui du haut #A5 qui est directement sous la roue lors du compactage. Ceci peut expliquer le décollement précipité du joint montré à la Figure 33b.

Même après un fléchissement de 10 mm, le joint #A5 partiellement décollé (Figure 34b) est encore plus fort que le maximum de force enregistré avec l'échantillon moins compacté #A2. Ces résultats témoignent de l'importance de la compaction près des joints d'enrobé pour obtenir une adhérence forte et durable entre les matériaux.

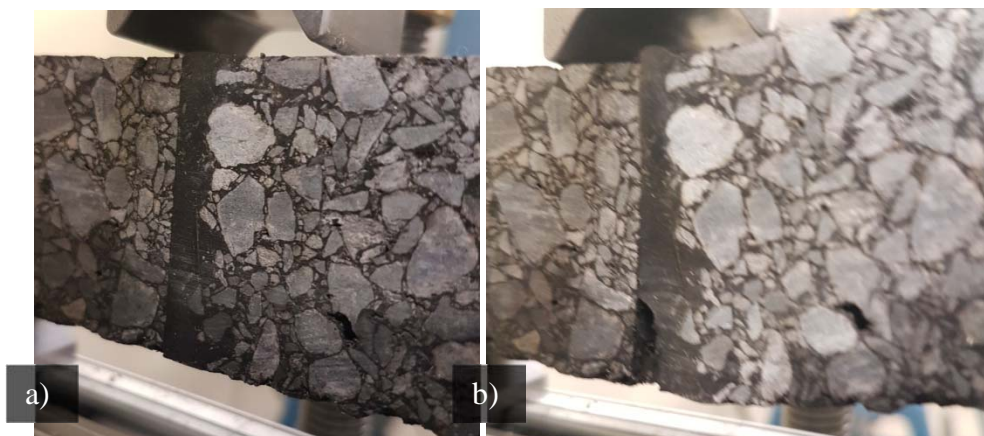


Figure 33 : a) Éprouvette #A2 non sollicitée de bande bitumineuse simplement appuyée et
b) Décollement de la bande bitumineuse du côté scié

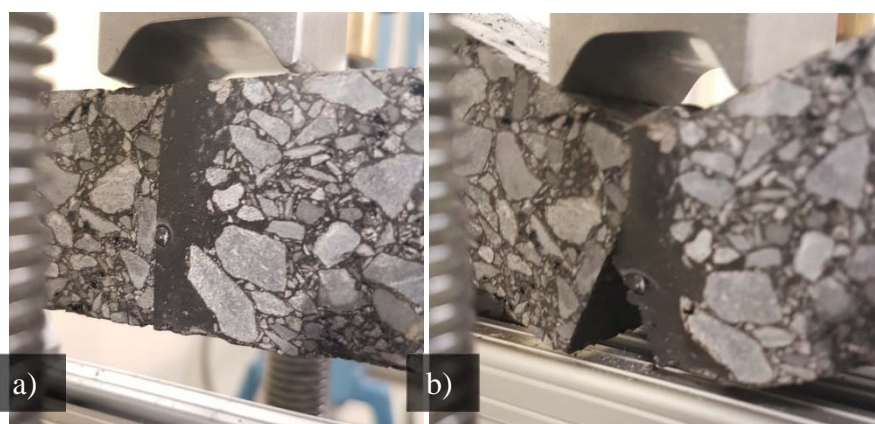


Figure 34 : a) Éprouvette #A4 non sollicitée de bande bitumineuse simplement appuyée et
b) Décollement de la bande bitumineuse du côté scié

5.4.2 Systèmes sollicités

5.4.2.1 Échantillons témoins (sans joint)

La Figure 35 présente les résultats des échantillons témoins sollicités par l'orniéreur. Les témoins issus du bas de la plaque enregistrent des forces maximales de près de 600 N à environ 2 mm de flexion, alors que ceux issus du haut de la plaque enregistrent des forces de 1000 N. La fissuration se produit au centre de la poutre, du bas vers le haut (Figure 36b). Il n'y a plus de force résiduelle après 4 à 8 mm de flexion selon l'échantillon. La différence d'amplitude mesurée pour les deux groupes de courbes tend à confirmer le rôle du compactage dans la résistance à la flexion.

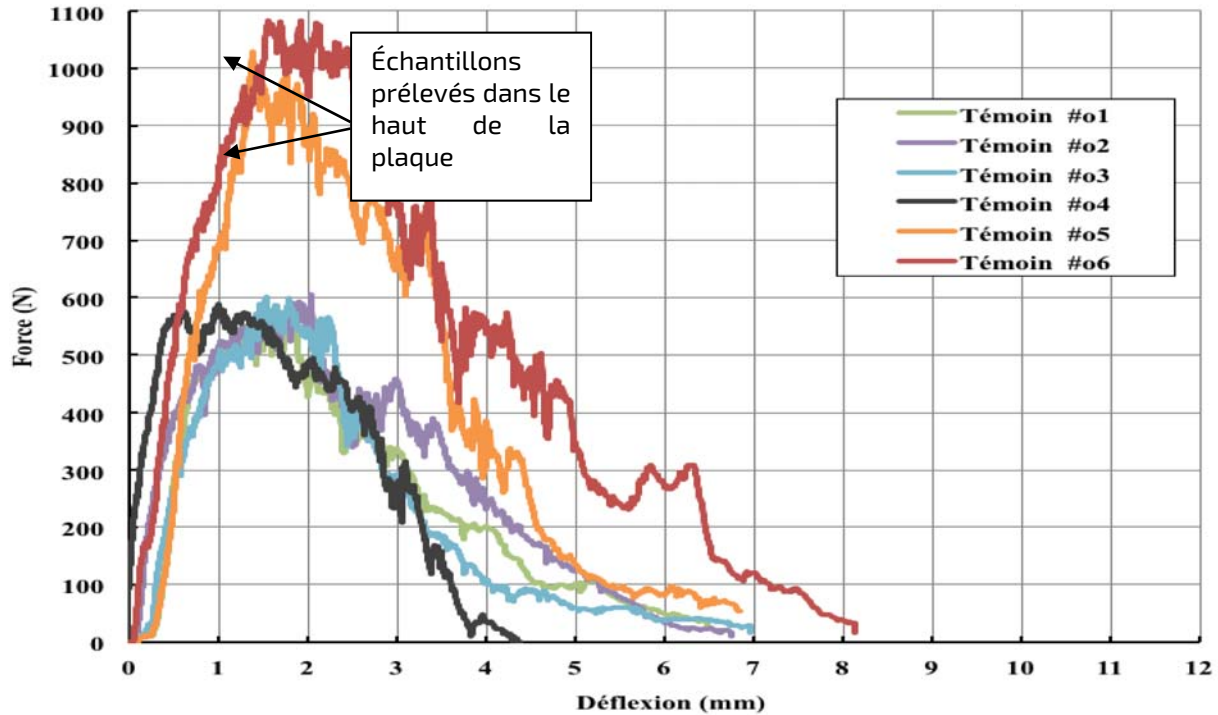


Figure 35 : Résultats de flexion des éprouvettes témoins ayant subi 30 000 cycles d'orniérage

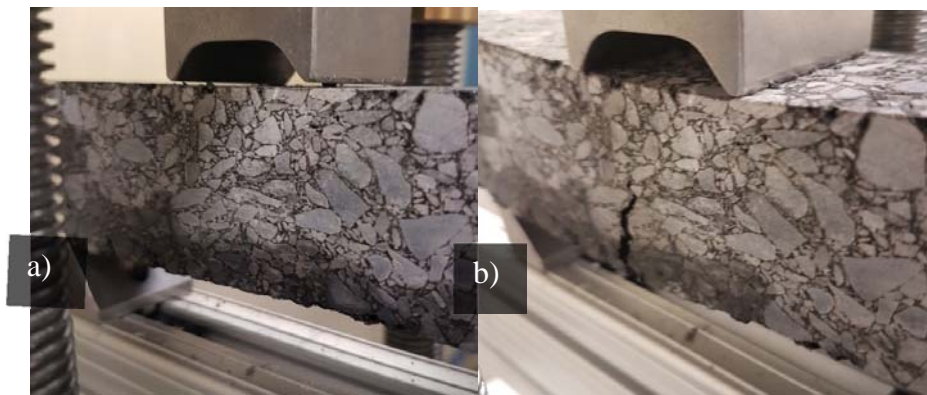


Figure 36: a) Éprouvette poutre témoin #06 d'enrobé orniéré sous la presse et b) Fissuration de l'éprouvette poutre témoin #06 Systèmes avec liaisonnement

5.4.2.2 Systèmes avec liaisonnement

La Figure 37 et la Figure 39 affichent les résultats de l'essai de flexion sur les systèmes de liaisonnement avec liant d'accrochage et bande bitumineuse pour les échantillons ayant été sollicités par l'orniéreur. La Figure 37 présente les résultats des poutres prélevées dans le haut de la plaque, tandis que la Figure 39 montre les résultats des poutres prélevées dans le bas de

la plaque. Pour les deux figures, les poutres échantillonnées proviennent de l'arrière, du centre et de l'avant de la plaque.

La Figure 37 permet de constater que la résistance à la flexion du système de bande bitumineuse est de 50 % à 100 % supérieure à celle du liant d'accrochage. La déflexion est jusqu'à deux à trois fois plus grande avec la bande bitumineuse qu'avec le liant d'accrochage. La force reprise par le domaine élastique des échantillons est aussi jusqu'à deux fois plus grande avec la bande bitumineuse.

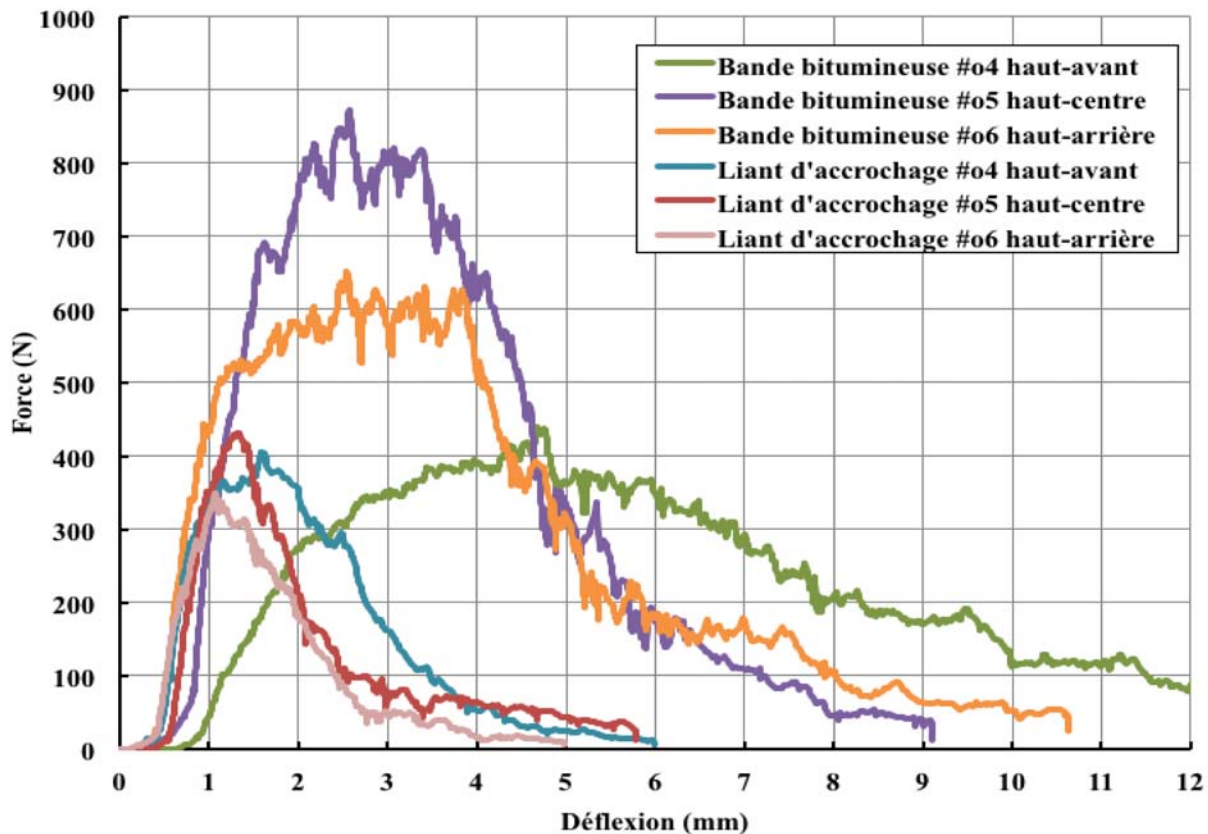


Figure 37 : Résultats de flexion des éprouvettes de plaques orniérées (haut de plaque)

En comparant les résultats avant et après sollicitation à l'orniéreur (Figure 31 et Figure 37), il est possible de voir que les performances des deux systèmes s'améliorent avec le compactage. Nonobstant les effets climatiques (soleil, eau, gel-dégel) cela suggère que le comportement des systèmes de liaisonnement s'améliore avec le trafic.

En comparant les résultats d'essai des échantillons témoins de la Figure 35 (sans joint) avec ceux des échantillons sollicités de la Figure 37, il est possible de constater que la résistance à la flexion est moins grande avec un joint. Par contre, le système avec bande bitumineuse montre une plus grande ductilité avant la rupture. Les pentes initiales de chargement des deux figures

sont très semblables. Dans les deux cas, elles indiquent que la résistance à la flexion est d'abord reprise par l'enrobé bitumineux et lorsque la force appliquée atteint la limite du liant d'accrochage, il y a rupture. Cependant, dans le cas des systèmes avec bande bitumineuse, il y a rupture dans l'enrobé bitumineux d'abord et ensuite transfert des forces vers la bande bitumineuse (Figure 38).



Figure 38 : Rupture des échantillons de bande bitumineuse #06 et #05 dans l'enrobé

La Figure 39 qui illustre les résultats pour les poutres prélevées au bas de la plaque montre essentiellement le même comportement que celles prélevées au haut de la plaque (Figure 37). L'amplitude en force est moindre, cependant, les valeurs de déflexion sont plus grandes pour ces échantillons. L'allure de la courbe montre aussi une rigidité des poutres du bas plus faible que celle du haut confirmant l'influence du degré de compactage.

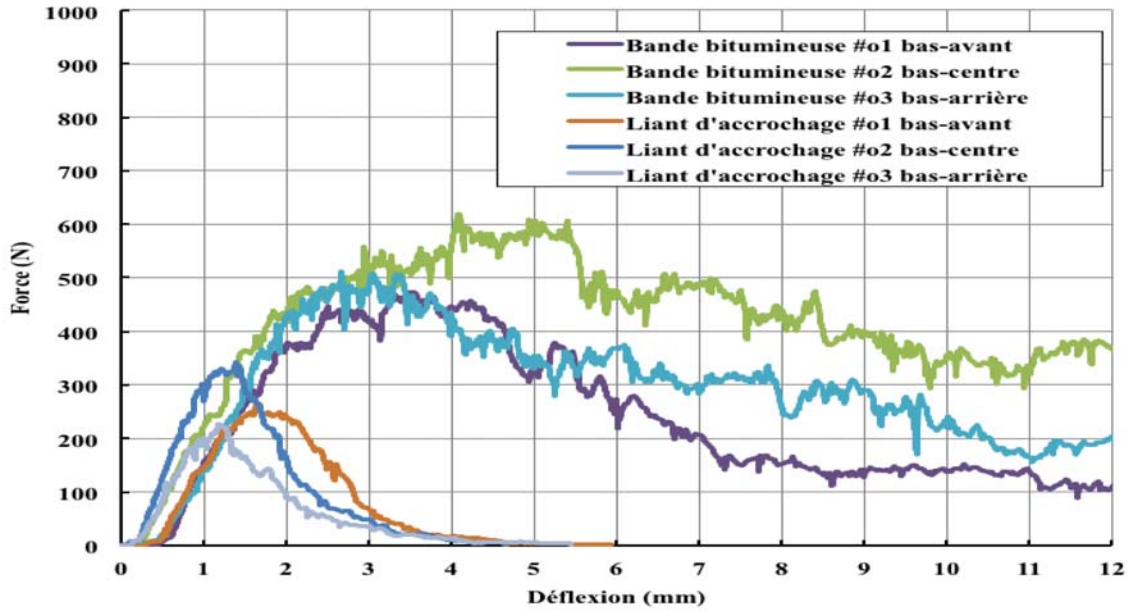


Figure 39 : Résultats de flexion des éprouvettes de plaques orniérées (bas de plaque)

La Figure 40 et la Figure 41 présentent les échantillons rupturés de la Figure 39. Même s'ils passent l'essai d'orniéreur, les échantillons contiennent tous des vides visibles, car ils sont prélevés dans le bas des plaques et cette région est moins bien compactée que celle du haut. Malgré ces vides, la bande bitumineuse ne s'est pas décollée et la rupture s'est produite dans l'enrobé, alors que les échantillons avec liant d'accrochage ont tous rupturé dans le joint.



Figure 40 : Flexion importante des éprouvettes avec bande bitumineuse #o1, #o2 et #o3, déchirement dans l'enrobé



Figure 41 : Flexion de 3 mm causant la rupture complète dans le joint des éprouvettes #o1, #o2 et #o3 avec liant d'accrochage

5.4.3 Résumé des résultats d'essais de flexion

Afin de résumer tous les résultats de flexion représentés graphiquement, les moyennes des forces maximales et des déflexions atteintes avant le début de la rupture sont illustrées au Tableau IV. Le type de liaisonnement, le nombre de poutres testées, la position dans la plaque, la force maximale et la déflexion correspondante sont présentés pour chaque catégorie d'échantillons. Les pourcentages d'amélioration de la force et de la déflexion qu'entraîne l'utilisation de la bande bitumineuse sont finalement présentés aux dernières colonnes.

Les résultats des essais sur joints non sollicités sont moins fiables que ceux sollicités, car un seul échantillon de chaque position a été testé (bas et haut de plaque). La bande bitumineuse améliore la force maximale de 26 % à 95 % et la déflexion de 210 % à 1011 %. Pour les systèmes sollicités, la bande bitumineuse améliore la force maximale de 67 % à 94 % et la déflexion de près de 200 %. La déflexion utilisée ici est celle correspondant à la force maximale. La rupture des échantillons avec bande bitumineuse, contrairement au liant d'accrochage, se fait de façon ductile, soit par décollement ou rupture dans l'enrobé. Le haut de l'un échantillon de bande bitumineuse reste toujours bien collé après l'essai de flexion.

Les résultats des échantillons témoins montrent qu'un enrobé issu du haut d'une plaque est 51 % plus fort avant la rupture qu'un échantillon du bas de plaque qui contient plus de vides.

Tableau IV : Résumé des essais de flexion

Type de liaisonnement	Nb de poutres testées	Position du joint testé	Force moyenne maximale (Fmax)	Déflexion moyenne à Fmax	Amélioration de force	Amélioration de déflexion
Bande bitumineuse non-sollicitée	1	bas de plaque	230 N	2,2 mm	26%	210%
Liant d'accrochage non-sollicité	2	bas de plaque	183 N	0,7 mm		
Bande bitumineuse non-sollicitée	1	haut de plaque	530 N	7,5 mm	95%	1011%
Liant d'accrochage non-sollicité	2	haut de plaque	272 N	0,7 mm		
Bande bitumineuse sollicitée	3	bas de plaque	517 N	4,1 mm	94%	198%
Liant d'accrochage sollicité	3	bas de plaque	266 N	1,4 mm		
Bande bitumineuse sollicitée	3	haut de plaque	652 N	4,0 mm	67%	198%
Liant d'accrochage sollicité	3	haut de plaque	390 N	1,3 mm		
Témoin (aucun joint)	3	haut de plaque	892 N	2,0 mm	51%	
Témoin (aucun joint)	3	bas de plaque	589 N	2,0 mm		

6. ESTIMATION DE COÛTS

Il existe plusieurs matériaux pouvant ressembler à ceux utilisés dans la présente étude. Le prix proposé des matériaux ne correspond pas nécessairement à tout ce qui se retrouve sur le marché. L'estimation des coûts réalisée ici est basée sur des prix fournis par l'entreprise qui a donné les matériaux et sur des prix affichés en ligne. Le prix est établi pour un mètre linéaire d'une tranchée à deux parois, les extrémités étant négligées. De plus, dans les deux cas, les surfaces sont considérées préparées et propres.

Le prix déterminé par mètre linéaire de tranchée est mis en relation avec le prix des travaux de tranchée linéaire réalisés par les responsables des entreprises de RTU.

6.1 Liant d'accrochage

Le liant d'accrochage se pose rapidement avec une buse ou une chaudière et un balai. Un contenant de 20 litres se détaille entre 50 \$ et 80 \$ et permet de faire environ 1000 mètres linéaires avec un taux de pose¹ d'environ 0,2 l/m². En considérant les pertes et une largeur de recouvrement de 150 mm, le coût du liant avoisine les 0,32 \$/m.l. de tranchée. En une heure, on peut s'attendre à ce qu'un ouvrier bien équipé applique le liant d'accrochage sur environ 200 m de joint (200 m/heure). Ceci représente environ 100 m.l. de tranchée.

Si l'ouvrier coûte 67 \$/heure², on a 0,67 \$/m.l. de tranchée pour la main-d'œuvre et 0,32 \$/m.l. de tranchée de matériau.

Coût unitaire estimé : 0,99 \$/m.l. de tranchée.

6.2 Bande bitumineuse

La pose de la bande bitumineuse nécessite la mise en place d'un apprêt qui est appliqué exactement de la même façon que le liant d'accrochage. Le prix de la boîte de bande bitumineuse *DensoBand* (3 rouleaux de 12 m) est environ de 500 \$ et le contenant de *Denso Primer D* est d'environ 180 \$ pour 5 litres, ce qui permet de couvrir 150 mètres par litre. Le coût total des matériaux est donc de 500 \$ (en négligeant l'apprêt qui est de 0,24 \$/m.l.) et permet de réparer 36 mètres linéaires, soit 18 mètres linéaires de tranchée. Le coût total unitaire des matériaux est de 27,78 \$/m.l. de tranchée.

¹ Le collage des couches, Colloque Bitume Québec, 26 novembre 2008

² Taux horaires suggérés pour les travaux de construction 2017, www.acq.org

Pour 36 mètres, on peut s'attendre à ce que le taux de pose de l'apprêt soit le même que le liant d'accrochage donc un ouvrier prend environ 10 minutes au pinceau. On estime qu'il faut environ une heure pour chauffer et coller la bande manuellement (36 m/heure).

Si on estime à 70 minutes au total la main-d'œuvre pour l'apprêt et l'installation de la bande bitumineuse et que le même ouvrier coûte 67 \$/heure, on a 27,78 \$ de matériau + 4,36 \$ de main-d'œuvre pour un mètre linéaire de tranchée.

Coût unitaire estimé : 32,14 \$/m.l. de tranchée.

Afin d'évaluer les coûts que représentent les opérations de jointement des enrobés bitumineux lors de la réalisation de tranchée, une enquête très sommaire est menée auprès des entreprises de RTU qui effectuent des travaux en tranchée. La Commission des services électriques de Montréal (CSEM) a fourni un prix détaillé des coûts de réalisation de quelques projets. À partir de ces coûts, on peut établir le rapport des coûts de scellement de joint par rapport aux travaux d'excavation et asphaltage et par rapport aux travaux d'asphaltage seulement. Énergir a aussi fourni des prix pour les opérations d'excavation et asphaltage seulement.

L'analyse est établie par mètre linéaire d'une tranchée de largeur moyenne de 600 mm. Elle demeure approximative et les coûts peuvent varier beaucoup en fonction de la nature exacte des travaux. Le tableau V présente ces résultats sous forme d'une fourchette envisageable de valeurs.

Tableau V : Ratio du scellement de joint sur le coût des travaux

	Asphaltage	Excavation-remblai / asphaltage	Projet entier
Coût / m.l. de tranchée	70 \$ à 85 \$	175 \$ à 220\$	400 \$ à 2400 \$
Liant d'accrochage	0,99 \$/70 \$ = 1,4 %	0,99 \$/175 \$ = 0,6 %	0,99 \$/400 \$ = 0,24 %
	0,99 \$/85 \$ = 1,2 %	0,99 \$/220 \$ = 0,5 %	0,99 \$/2400 \$ = ---
DensoBand	32,14 \$/70 \$ = 46 %	32,14 \$/175 \$ = 18 %	32,14 \$/400 \$ = 8 %
	32,14 \$/85 \$ = 38 %	32,14 \$/220 \$ = 15 %	32,14 \$/2400 \$ = 1,3 %

Il est clair que plus le coût des travaux est important, plus les coûts de jointement deviennent négligeables.

7. DISCUSSION

Les essais réalisés sur les deux systèmes de liaisonnement avec liant d'accrochage et bande bitumineuse sont comparés sur la base de deux critères de performance importants soit : leur capacité à étanchéiser un joint de construction réalisé dans l'enrobé bitumineux et leur capacité à lier les deux surfaces du joint de construction.

Les essais de perméabilité montrent que la bande bitumineuse est imperméable à l'écoulement à travers le joint et dans le joint. L'eau ne la traverse pas. L'écoulement observé dans les éprouvettes avec bande bitumineuse posée verticalement se fait dans l'enrobé bitumineux. Le liant d'accrochage utilisé dans cette étude laisse passer l'eau autant, sinon plus que l'enrobé bitumineux.

Sachant que l'eau est un facteur important affectant la performance des chaussées, le système de liaisonnement avec bande bitumineuse est recommandé pour résister à l'eau.

L'essai de traction directe vise à simuler les forces induites dans l'enrobé bitumineux lors du retrait thermique provoqué dans la chaussée par la baisse de température. Les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés en chantier et fabriqués en laboratoire ainsi que sur des échantillons ayant subi des essais de perméabilité.

On remarque que pour les échantillons de chantier et ceux de laboratoire, la résistance à la rupture est plus grande avec le système de liaisonnement avec bande bitumineuse. La ductilité, c'est-à-dire la capacité de se déformer et de s'allonger est plus grande avec le système avec bande bitumineuse, et ce avant et après avoir atteint la force maximale lors de l'essai. Dans le cas de la bande bitumineuse, on ne parle pas de rupture proprement dite. Après avoir atteint sa valeur maximum, la force décroît à cause de l'élongation du joint et de la diminution de sa section qui nécessite donc moins d'effort pour une même déformation. Éventuellement, il se peut que le joint de bande bitumineuse se décolle de la paroi du joint ou se déchire (rupture).

En comparaison, le système avec liant d'accrochage se déforme très peu et il rupture toujours dans le joint.

Les essais à l'orniéreur montrent que l'enrobé bitumineux se compacte davantage dans le haut de la plaque que dans le bas. L'orniéreur a pour effet d'augmenter la force de liaisonnement pour les deux systèmes allant jusqu'à doubler cette force. Parce que le joint est plus large, le système avec bande bitumineuse a plus tendance à se déformer à l'orniéreur. Cela suggère qu'un joint de bande bitumineuse pourrait s'affaisser de quelques millimètres de plus qu'un joint standard.

L'essai de flexion sur poutre veut simuler le mouvement de la chaussée au droit du joint lors du passage du véhicule ou lors d'un mouvement de fondation. Il s'agit cependant d'une grande approximation, mais les essais réalisés montrent l'augmentation de la rigidité et de l'adhérence.

Cet essai a permis de constater que l'enrobé bitumineux sans joint possède une résistance en flexion trois fois plus grande que l'enrobé bitumineux jointé avec un liant d'accrochage et seulement une fois et demie plus grande que l'enrobé bitumineux jointé avec de la bande bitumineuse.

De plus, avec ou sans sollicitation avec l'orniéreur, le joint avec bande bitumineuse est toujours de deux à trois fois plus résistant que le joint avec liant d'accrochage. Mais surtout, il est de plusieurs fois (3 à 5) plus extensible avant décollement et déchirure que l'autre.

La fissure qui se développe dans un joint avec bande bitumineuse est toujours du côté du joint scié. La préparation de surface est plus qu'importante pour assurer la durabilité du joint.

Même si le coût unitaire de la bande bitumineuse est environ 18 fois plus élevé que le liant d'accrochage, une bande bitumineuse correctement installée prévient la détérioration de la chaussée et fondation aux endroits rapiécés (en milieu urbain, c'est omniprésent). Pour optimiser les coûts, il peut être intéressant d'exiger ce type de produit sur des chaussées encore en bon état. Son utilisation sur une chaussée dégradée n'est pas pertinente.

8. CONCLUSION

Cette étude porte sur la comparaison de deux systèmes de liaisonnement d'enrobé bitumineux le système avec liant d'accrochage et celui avec bande bitumineuse. Les essais réalisés permettent de simuler l'étanchéité et la résistance de ces systèmes de liaisonnement.

À la suite d'essais de perméabilité, de traction, d'ornièreur et de flexion réalisés, les déductions suivantes peuvent être établies:

- L'étanchéité du système de bande bitumineuse est conservée avec des élongations jusqu'à 10 mm en traction représentant le retrait thermique ;
- L'étanchéité du système de bande bitumineuse est conservée avec des étirements en flexion de plus de 12 mm alors qu'un joint avec liant d'accrochage s'ouvre à partir de 2 mm ;
- La bande bitumineuse a donc une plus grande capacité d'étanchéité à long terme puisqu'elle possède une plus grande résistance à l'arrachement et à la flexion et peut s'autoréparer ;
- Pour certains cas de chargement, la bande bitumineuse est plus résistante que l'enrobé bitumineux, contrairement au liant d'accrochage qui est toujours plus faible.

Bien que la différence de coûts soit très importante entre la bande bitumineuse et le liant d'accrochage, il reste que cette dépense est relativement minime par rapport aux coûts d'un projet. Cependant, l'amélioration de la performance de la réparation aura une incidence certaine sur les coûts futurs d'entretien de la chaussée.

Pour ces raisons, ce rapport recommande d'utiliser la bande bitumineuse comme matériau de liaisonnement des joints réalisés dans les enrobés bitumineux.

9. RÉFÉRENCES

Rerolle, A. 2015. « Étude comparative de systèmes d'étanchéité et de liaisonnement de surfaces d'enrobés bitumineux », École de technologie supérieure.

Le collage des couches, Colloque Bitume Québec, 26 novembre 2008 (en ligne)

Taux horaires suggérés pour les travaux de construction 2017, www.acq.org (en ligne)

ANNEXE 1 – Graphiques d'orniérage

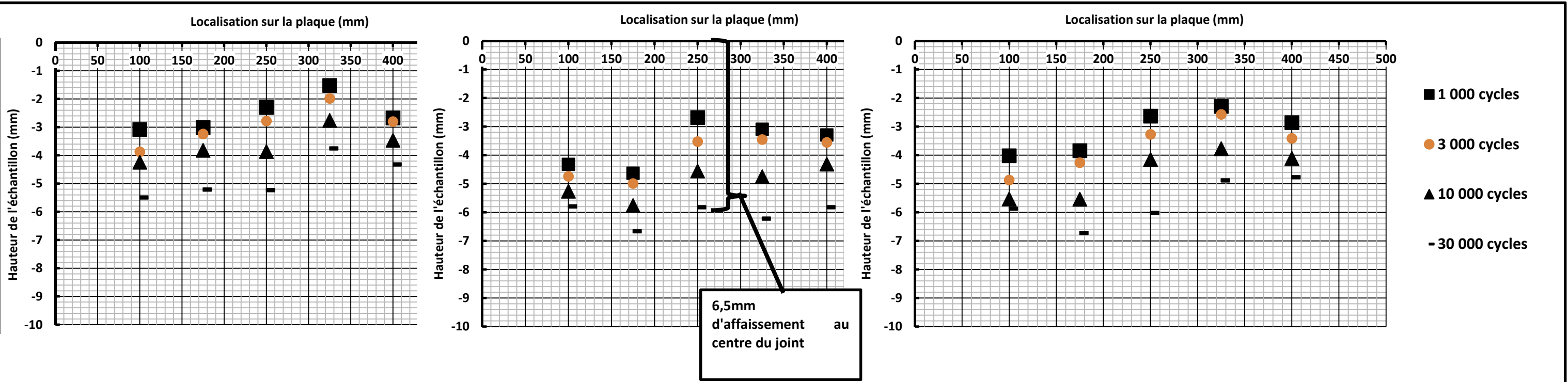
POSITION SUR LA PLAQUE

AVANT

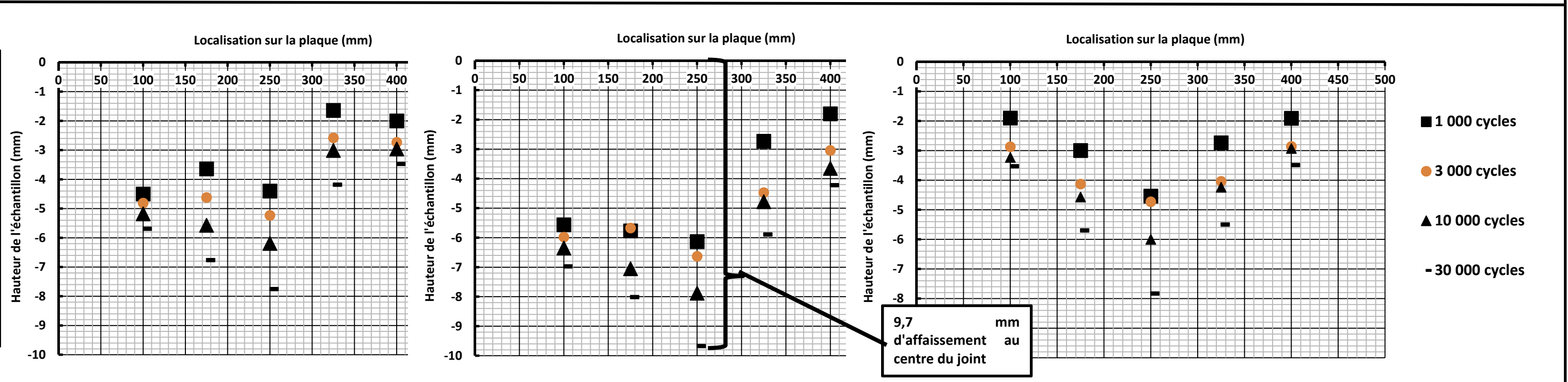
CENTRE

ARRIÈRE

LIANT D'ACCROCHAGE



BANDE BITUMINEUSE



ANNEXE 2 – Rapport d'étude 2015

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

RAPPORT PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Ing.

PAR
Arthur REROLLE

ÉTUDE COMPARATIVE DE SYSTÈMES D'ÉTANCHÉITÉ ET DE LIAISONNEMENT
DE SURFACES D'ENROBÉS BITUMINEUX

MONTREAL, LE "11 NOVEMBRE 2015 AU BUREAU DES CYCLES SUPÉRIEURS"



Arthur Rerolle, 2015



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier la Professeure Claudiane Ouellet-Plamondon pour son soutien et sa disponibilité tout au long du processus et sans quoi ce projet n'aurait pas eu lieu.

Ensuite je voudrais remercier le Professeur Michel Vaillancourt qui m'a beaucoup aidé tout au long du projet. Son expertise et son expérience auront été d'une aide précieuse.

Une pensée particulière aux techniciens de laboratoire de L'École de Technologie Supérieure qui m'auront aidé quotidiennement, tout particulièrement messieurs Sylvain Bibeau, Francis Bilodeau et Alexis Vadeboncoeur. Ainsi qu'à Sébastien Lamothe qui m'a beaucoup conseillé.

Également, un grand merci à M. Denis Poirier, membre du CERIU, qui aura été un collaborateur indispensable à ce projet.

Enfin, je voudrais remercier mes proches pour leur soutien et la confiance qu'ils placent en moi.

ÉTUDE COMPARATIVE DE SYSTÈMES D'ÉTANCHÉITÉ ET DE LIAISONNEMENT DE SURFACES D'ENROBÉS BITUMINEUX

Arthur REROLLE

RÉSUMÉ

Le réseau routier est souvent sujet à des travaux de réparation car il est très exposé. Ces réparations provoquent des discontinuités au sein de la chaussée, notamment en surface, qui peuvent devenir des zones de faiblesses et de fragilité pour l'enrobé bitumineux. Afin d'assurer une continuité physique et mécanique, certains matériaux de réparation sont utilisés sur les chantiers. Traditionnellement, c'est un liant d'accrochage (émulsion de bitume) qui est appliqué sur l'interface entre enrobé existant et nouvel enrobé.

Récemment, un nouveau matériau de réparation a été développé par l'entreprise Denso. Il s'agit d'une bande bitumineuse qui a pour but de concurrencer l'émulsion en offrant de meilleures performances et donc de changer les pratiques dans l'industrie.

L'objectif de ce projet est donc de vérifier de manière pratique si la bande est plus performante. Pour cela, on évalue deux facteurs : la résistance à l'arrachement et la perméabilité.

Deux essais de laboratoire seront donc réalisés : un essai de traction et un essai de perméabilité. Ces essais ne suivent aucune norme et ne sont pas standard, ils ne sont donc pas conventionnels. Le but étant une comparaison relative des deux matériaux.

Des éprouvettes réalisées en laboratoire, de façon standard, seront testées avant et après cycles de gel-dégel. Une attention particulière sera portée sur la teneur en vides des éprouvettes.

La comparaison des données suivant chacun des types d'éprouvette permettra de déterminer leurs performances relatives dans le but de produire une recommandation.

Ainsi, d'un point de vue purement des performances, il apparaît que la bande bitumineuse est un matériau très compétitif pour les deux facteurs mis en évidence dans ce projet.

Mots clés: Enrobé bitumineux, Matériau de réparation, Liant d'accrochage, Bande bitumineuse, Denso, Essai de traction, Essai de perméabilité, Cycle de gel-dégel, teneur en vides, Comparaison, Performance

COMPARATIVE STUDY OF SEALING SYSTEMS AND ASPHALT SURFACE BONDING

Arthur REROLLE

ABSTRACT

The road network is often subject to repairs because of its exposure. These repairs cause discontinuities in the floor that can become areas of weakness and fragility to the asphalt. To ensure continuity, some repair materials are used on construction sites. Traditionally, a coupling binder (bitumen emulsion) which is applied to the interface between existing and new coated.

Recently, a new repair material was developed by the company Denso. This is a bituminous tape intended to compete with the emulsion by offering better performance and therefore to change the practices in the industry.

The purpose of this project is therefore a practical way to check if the tape is performing in two factors : the pull-out strength and permeability.

Two laboratory tests will be carried out : a tensile test and permeability test. These tests do not follow any standards, they are not conventional. The goal is a relative comparison of the two materials.

Test specimens made in laboratory, in a standard manner, will be tested before and after freeze-thaw cycles. Particular attention will be paid to the void content of the specimens.

Comparing data according to each type of specimen will determine their relative performance in order to produce a recommendation.

Thus, from a viewpoint purely performance, it appears that the bituminous tape is a very competitive material for the two factors highlighted in this project.

Keywords: Asphalt, repairing material, binder bonding, bituminous tape, Denso, tensile test, permeability tests, freeze-thaw cycle, void content, Comparison, Performance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Problématique générale	3
1.2 Les enduits d'accrochage.....	3
1.2.1 Description.....	3
1.2.1.1 Les émulsions de bitume	4
1.3 État des choses aujourd'hui au Québec	5
1.4 La bande bitumineuse Denso.....	6
1.4.1 Description.....	8
1.4.2 L'apprêt d'accrochage.....	9
1.4.3 Joints bitumineux posés à la main	9
1.4.3.1 Tok-Band SK	10
1.4.3.2 Tok-Band SK Mark.....	11
1.4.3.3 Tok-Band Drain SK	13
1.4.3.4 Tok-Band Spezial.....	14
1.4.3.5 Tok-Band Spezial DR	16
1.4.3.6 Tok-Band T.....	17
1.4.4 Joints bitumineux posés à la machine	19
1.4.4.1 La machine de pose : TOKOMAT	19
1.4.4.2 Le matériau de pose : TOKOMAT - Riegel	19
1.5 Existe-t-il d'autres alternatives équivalentes ?.....	20
1.5.1 Crafc.....	20
CHAPITRE 2 OBJECTIFS PRINCIPAUX DU RAPPORT.....	21
CHAPITRE 3 PROGRAMME D'ESSAIS	23
3.1 Hypothèses	23
3.2 Essai d'arrachement par traction mécanique	24
3.3 Essai d'étanchéité par succion confinée	25
3.4 Tableau récapitulatif	26
CHAPITRE 4 PROCÉDURE DES ESSAIS.....	29
4.1 Matériaux utilisés	29
4.1.1 Granulat	29
4.1.2 Bitume.....	30
4.2 Formulation de l'enrobé	31
4.3 Élaboration du système de réparation.....	33
4.3.1 Confection des plaques d'enrobés en laboratoire	33
4.3.1.1 Malaxage.....	33

4.3.1.2	Compactage	35
4.3.1.3	Vérification de la densité maximale du mélange	38
4.3.1.4	Calcul de la densité brute	39
4.3.2	Sciage des plaques	41
4.3.3	Application du matériau de réparation	42
4.3.3.1	Temps de pose	42
4.3.4	Application de la dernière couche d'enrobé	44
4.3.5	Échantillon final	45
4.4	Confection des éprouvettes en laboratoire	46
4.4.1	Carottage	46
4.4.2	Sciage	48
4.4.3	Meulage	49
4.5	Description des essais	49
4.5.1	Essais d'arrachement	49
4.5.2	Essai d'étanchéité	52
4.5.2.1	Procédure détaillée	53
4.6	Cycles de Gel-Dégel	54
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS		61
5.1	Teneur en vides	61
5.2	Essais d'arrachement	64
5.3	Essais de perméabilité	67
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS		71
6.1	Teneur en vides	71
6.2	Essais d'arrachement	73
6.2.1	Zone de fracture	73
6.2.2	Cycles de Gel-Dégel	74
6.3	Essais de perméabilité	76
6.3.1	Imperméabilité des éprouvettes réparées à la bande bitumineuse	76
6.3.2	Cycles de Gel-Dégel	78
6.4	Récapitulatif	81
CONCLUSION		83
ANNEXE I	DONNÉES DES ESSAIS D'ARRACHEMENT	87
ANNEXE II	DONNÉES DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ	99
RÉFÉRENCES		103

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Composition des émulsions5
Tableau 1.2	Essais suivants les recommandations TL Fug-StB7
Tableau 1.3	Essais suivant les recommandations ASTM D 66908
Tableau 1.4	Résultats des essais pour Tok-Band SK suivant la norme11
Tableau 1.5	Résultats des essais pour Tok-Band SK Mark suivant la norme.....12
Tableau 1.6	Résultats des essais pour Tok-Band Drain SK suivant la norme14
Tableau 1.7	Résultats des essais pour Tok-Band Spezial suivant la norme.....15
Tableau 1.8	Résultats des essais pour Tok-Band Spezial DR suivant la norme17
Tableau 1.9	Résultats des essais pour Tok-Band T suivant les normes.....18
Tableau 3.1	Récapitulatif du programme d'essais.....27
Tableau 4.1	Granulométrie type des ESG-10.....30
Tableau 4.2	Granulométrie de l'enrobé élaboré31
Tableau 4.3	Récapitulatif de la formulation de l'enrobé33
Tableau 4.4	Résultats des pesées pour D_{mm}38
Tableau 4.5	Résultats des pesées pour D_{brut}39
Tableau 4.6	Différence de carottages46
Tableau 5.1	% _{vide} suivant les types d'éprouvettes.....61
Tableau 5.2	Moyennes des densités brutes et % de vides pour les éprouvettes testées avec un joint horizontal62
Tableau 5.3	Moyennes des densités brutes et % de vides pour les éprouvettes testées avec un joint vertical63

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Structure d'une tranchée (Miard (2010)).....	2
Figure 1.1	Vue à partir d'un microscope d'une émulsion de bitume (Trudeau (2003)).....	4
Figure 1.2	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band SK (Denso (2014))	10
Figure 1.3	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band SK Mark (Denso (2014)).....	12
Figure 1.4	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Drain SK (Denso (2014))	13
Figure 1.5	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Spezial (Denso (2014)).....	15
Figure 1.6	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Spezial DR (Denso (2014)).....	16
Figure 1.7	Profil de la bande bitumineuse Tok-Band T (Denso (2014)).....	18
Figure 1.8	Machnie Tokomat en fonctionnement (Denso (2014)).....	19
Figure 1.9	Machnie de pose d'adhésif pour joint en fonctionnement (source : Crafc).....	20
Figure 3.1	Presse MTS 858 mini Bionix.....	24
Figure 3.2	Vue d'ensemble du dispositif de l'essai de perméabilité.....	25
Figure 4.1	Four pour matériaux d'enrobés bitumineux	34
Figure 4.2	Malaxeur pour enrobés bitumineux.....	34
Figure 4.3	Compacteur MLPC de plaques d'enrobés	35
Figure 4.4	Compactage d'un échantillon	36
Figure 4.5	Séquençage des passes de la roue du compacteur pour le compactage des plaques.....	36
Figure 4.6	Effet de paroi sur l'agencement des particules d'un matériau granulaire (béton ici)	37
Figure 4.7	Photo du dispositif de pesée de l'échantillon lorsqu'il est immergé	41

Figure 4.8	Deux coupes transversales de plaques <i>sandwich</i> (de gauche à droite : bande et liant) posées sur une demie plaque.....	42
Figure 4.9	La bande est posée après 20 minutes de séchage de l'apprêt.....	43
Figure 4.10	La demi-plaque est prête à recevoir la nouvelle couche d'enrobé	44
Figure 4.11	Le nouvel enrobé est compacté.....	44
Figure 4.12	Échantillon final.....	45
Figure 4.13	Plaques carottées pour les essais d'arrachement.....	47
Figure 4.14	Localisation des carottes sur les plaques suivant le type d'éprouvette (de gauche à droite : traction, perméabilité joint horizontal, perméabilité joint vertical).....	47
Figure 4.15	Sciage d'une face de la carotte.....	48
Figure 4.16	Schémas des différentes éprouvettes finales	48
Figure 4.17	Banc de collage utilisé	50
Figure 4.18	Presse hydraulique utilisée pour coller les autres casques	50
Figure 4.19	L'éprouvette est prête à être testée et entreposée dans un bain de sable pour prévenir les déformations dues au fluage	51
Figure 4.20	Schéma explicatif de l'essai de perméabilité	52
Figure 4.21	Mise en place de la membrane.....	53
Figure 4.22	Premières précautions de mises en place du scellement à la base	54
Figure 4.23	Fin de la mise en place de la cellule	55
Figure 4.24	Les barres métalliques empêchent le retrait de l'éprouvette.....	56
Figure 4.25	Mise en place du dispositif de CGD pour les éprouvettes avec joint vertical	57
Figure 4.26	Dispositifs finaux de montage pour le CGD.....	57
Figure 4.27	Schéma des dispositifs avec illustration des contraintes au sein de l'éprouvette pendant contraction thermique due à une faible température	58

Figure 4.28	Graphique montrant l'évolution de la température au sein de l'enceinte	58
Figure 5.1	Graphique représentant les caractéristiques à l'essai de traction d'une éprouvette réparée au liant d'accrochage, après CGD.....	65
Figure 5.2	Histogramme récapitulatif des moyennes de force résistante à l'essai de traction suivant les différents types d'éprouvettes avant traitement des données.....	66
Figure 5.3	Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec un joint horizontal	67
Figure 5.4	Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec un joint vertical.....	68
Figure 5.5	Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint horizontal.....	69
Figure 5.6	Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint vertical.....	69
Figure 6.1	Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec joint horizontal après traitement des données	72
Figure 6.2	Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec joint vertical après traitement des données.....	72
Figure 6.3	Éprouvette après l'essai d'arrachement	74
Figure 6.4	Histogramme des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données sur les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse.....	75
Figure 6.5	Histogramme récapitulatif des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données final	76
Figure 6.6	Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint horizontal après traitement des données final.....	79
Figure 6.7	Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint vertical après traitement des données final.....	79
Figure 6.8	Histogramme récapitulatif des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données final	81

Figure 6.9	Histogramme récapitulatif des écoulements pour les éprouvettes réparées au liant d'accrochage après traitement des données final.....	82
------------	---	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETS	École de Technologie Supérieure
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
TL	Technische Lieferbedingungen
fug-STB	Fugen in Verkehrsflächen
EN	European Norm
DIN	Deutsches Institut für Normung
TP	Technische Prüfbedingungen
NF	Norme Française
ASTM	American Society for Testing and Material
SK	SelbtsKleben
CGD	Cycle de Gel-Dégel
ESG	Enrobé Semi Grenu
MTQ	Ministère des Transports du Québec
GNM	Grosneur Nominale Maximale
PG	Performance Grade
DSR	Dynamic Shear Rheometer
BBR	Bending Beam Rheometer
$X_{i,j,k}$	Désignation des éprouvettes
D_{mm}	Densité maximale du mélange
M_{mm}	Masse maximale du mélange
V	Volume
L	Longueur
l	largeur

XVIII

M_{relle}	Masse réelle du mélange
M_{bitume}	Masse totale de bitume
$M_{granulats}$	Masse totale de granulats
M_{5-10}	Masse totale de granulats grossiers
M_{0-5}	Masse totale de granulats fins
$M_{0-0,08}$	Masse totale de filler
LC	Laboratoire de Chaussées
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
M_1	Masse du mélange à sec
M_2	Masse du pot, de la plaque et de l'eau
M_3	Masse du pot, de la plaque, de l'eau et du mélange
D_{brut}	Densité brute de l'éprouvette
M_{sche}	Masse de l'éprouvette à sec
$M_{immerge}$	Masse de l'éprouvette dans l'eau
M_{SSS}	Masse de l'éprouvette saturée en eau et sèche en surface
V_l	Volume de liant
T	Taux d'application
S	Surface

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	millimètre
kPa	kiloPascal
C	Celsius
mL	milliLitre
min	minute
L	Litre
kg	kilogramme
g	gramme
N	Newton
mm/min	millimètre par minute
sec	seconde
cm	centimètre

INTRODUCTION

Le réseau routier est un réseau dessiné au grès des aménagements urbains au cours de l'histoire. Ainsi, ce réseau peut être dessiné depuis des décennies voire des siècles sur certains territoires, notamment sur le continent européen.

Ce n'est qu'après la révolution industrielle que les réseaux civils d'adduction d'eau, d'électricité, de gaz ou encore d'égout ont vu le jour et se sont développés massivement à l'échelle humaine. C'est en partie en utilisant le réseau routier préexistant que ces réseaux ont pu se développer ainsi. Désormais, au niveau urbain, la majeure partie des conduites de gaz, des gaines électriques et des aqueducs sont enfouis sous le réseau routier. De plus, leurs ramifications sont énormes et couvrent une large partie de l'espace urbain car elles doivent équiper tous les habitants, sans exception. Il y a donc des réseaux souterrains sous chaque route municipale ou à leurs abords (à quelques exceptions près).

C'est donc avec un certain avantage que le réseau routier est mis à contribution par ces industries. Cependant, le transport d'énergie ou de matières est une activité où tout n'est pas totalement maîtrisé. Il y a donc une maintenance nécessaire et non négligeable au sein de ces réseaux connexes. Voilà pourquoi il est possible de voir, sur beaucoup de routes, des morceaux d'enrobés nouveaux au milieu d'un vieil enrobé. En effet, c'est à ces endroits qu'ont eu lieu des activités de maintenances du réseau souterrain. Ces activités nécessitent l'ouverture d'une tranchée au sein de la chaussée afin d'accéder directement au réseau d'adduction d'eau, par exemple, lors d'une fuite.

Lorsque la tranchée est ouverte et que les opérations de maintenance sont réalisées, il faut ensuite réparer la tranchée.

Il s'agit donc de recouvrir le réseau réparé, puis de remblayer la couche de forme jusqu'à la structure de chaussée. Enfin, il faut réparer la structure de chaussée avec un nouvel enrobé bitumineux, voir la figure 0.1.

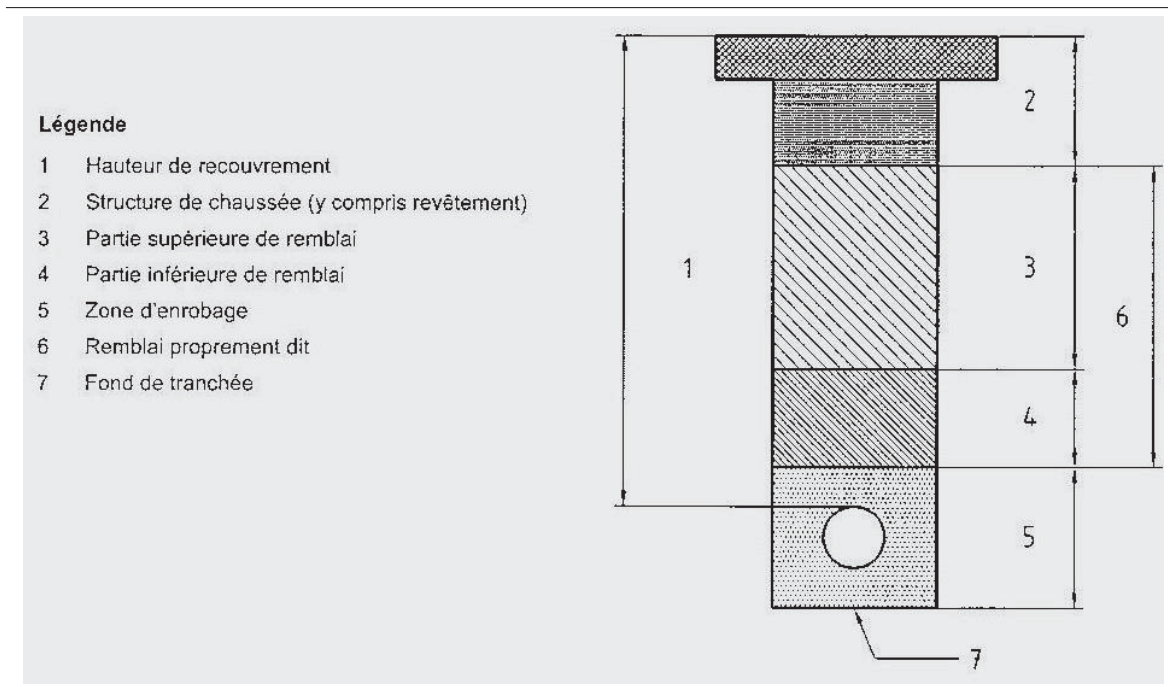


Figure 0.1 Structure d'une tranchée (Miard (2010))

On ne parlera pas ici des détails de remblaiement de la couche de forme mais uniquement de la réparation de la structure de chaussée et plus particulièrement la jonction entre enrobé nouveau et vieil enrobé, le point faible de la réparation. En effet, le lien entre les couches d'enrobés doit être performant afin d'assurer un comportement mécanique optimal mais aussi en terme de durabilité. Si le lien n'est pas suffisant, on crée une mauvaise répartition des charges entraînant des dégradations de manière systématique. Enfin le problème d'étanchéité est aussi une conséquence de ce liaisonnement qui, s'il n'est pas bien réalisé, entraîne la réduction de la portance de la fondation et la dégradation de la structure.

C'est donc vers cette direction que s'oriente ce rapport en effectuant une étude comparative de deux techniques de liaisonnement de surface d'enrobés bitumineux : une technique traditionnelle à base d'enduit d'accrochage et une méthode nouvelle utilisant une bande bitumineuse de scellement.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Problématique générale

La mise sur le marché de nouveaux produits de scellement de joint remet en question les pratiques traditionnelles dans l'industrie. Ainsi, ayant à faire à un produit récent où les retours d'expériences restent très limités en comparaison des méthodes traditionnelles, il est nécessaire d'évaluer de manière *pragmatique* les performances de cette bande et d'y confronter les exigences économiques qu'elle suppose afin de recommander l'utilisation, ou non, à grande échelle de la technique. Sans oublier que de modifier les procédés de réparation de tranchées chez une entreprise induit aussi des frais connexe relatifs à la formation des ouvriers ou encore à des changements en terme administratifs.

1.2 Les enduits d'accrochage

Lorsque la chaussée existante doit subir un rapiéçage, on utilise traditionnellement un liant d'accrochage pour cohésionner les deux couches d'enrobés bitumineux entre elles. Il est donc recommandé (Bitume-Québec (2008)) d'appliquer une couche de liant d'accrochage sur le fond et la surface sciée préalablement afin d'assurer la cohésion du système. Cette étape doit précéder l'épandage du nouvel enrobé.

1.2.1 Description

Il existe plusieurs types de liants d'accrochage, cependant ils ont tous la même particularité : il s'agit d'un liant bitumineux. Il peut aussi s'agir de bitumes ou bitumes fluidifiés, cependant l'émulsion de bitume reste la plus utilisée.

1.2.1.1 Les émulsions de bitume

Une émulsion est un mélange hétérogène de deux liquides non miscibles dont l'un forme des gouttelettes microscopiques en suspension dans l'autre (source : Le petit Robert). Ici, les gouttelettes sont formées par le bitume en suspension dans l'eau, voir figure 1.1.

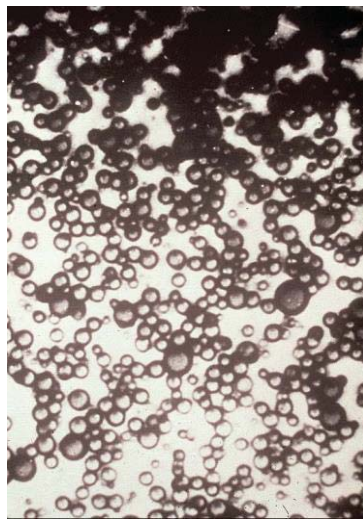


Figure 1.1 Vue à partir d'un microscope d'une émulsion de bitume (Trudeau (2003))

Pour créer l'émulsion, il faut la présence de deux énergies : une énergie mécanique et l'ajout d'émulsifiant qui fournit l'énergie chimique. On observe alors la dispersion en fines gouttelettes du bitume dans l'eau. L'émulsifiant sert à stabiliser l'ensemble qui a tendance à revenir à son état initial que l'on peut voir sous le phénomène de la coalescence. On dit que le mélange est instable car il a en effet tendance à revenir à son état initial.

Le tableau 1.1 récapitule les proportions de chaque composé.

Le diamètre moyen d'une gouttelette de bitume est de l'ordre de 5.10^{-6} m. De plus, sous l'effet mécanique, un gramme de bitume peut former dix milliards de gouttelettes. La surface spécifique de ce gramme de bitume peut donc atteindre jusqu'à 2 m^2 (LeBec (2012)).

Tableau 1.1 Composition des émulsions

Composants	Proportions volumiques en %
Bitume	50 à 70 ^A
Eau	30 à 50
Émulsifiants	0,2 à 2,5
Solvants	0 à 30
Polymères	0 à 4
Autres additifs	Traces ^B

^A typiquement 59 à 62

^B $CaCl_2$, épaississant, etc

Afin d'atteindre une telle surface, l'ajout d'émulsifiant est essentiel. Leur présence permet de réduire l'énergie mécanique nécessaire à la fabrication de l'émulsion en abaissant la tension de surface ce qui a pour conséquence directe de stabiliser l'émulsion lors de son entreposage.

La fabrication d'une émulsion crée un liant visqueux sous forme fluide.

1.3 État des choses aujourd'hui au Québec

Selon Bitume-Québec (2010), le réseau routier québécois s'étend sur 185 000 km. Ce réseau routier est découpé en trois catégories :

autoroutes, routes nationales et régionales : 29 000 km

routes municipales : 92 000 km

autres réseaux : 60 000 km

Au Québec, les contraintes météorologiques sont très importantes et elles sont un facteur majeur pour la conception dans le domaine de la construction. Dans le secteur routier, les dommages causés par les basses températures l'hiver et la grande plage de température auxquels est

soumise la province en font une région très difficile à développer. En effet, les chaussées sont soumises à de très faibles températures et de nombreux cycles de gel-dégel (CGD) qui sont très dommageable pour les enrobés bitumineux, entre autres. Ainsi, la rigueur est de mise sur le secteur de la construction routière pour concevoir des infrastructures de qualité et durables dans le temps. Comme il a été évoqué précédemment, les zones de réparation d'enrobés sont des zones critiques où la jonction entre enrobé existant et enrobé de rapiéçage est un point de faiblesse de la structure. C'est en effet à cet endroit que peuvent avoir lieu des infiltrations d'eau et de mauvaises répartitions de charge lors de la phase d'exploitation de la structure pouvant créer fissuration, pelade et autres pathologies intrinsèques aux enrobés bitumineux.

Traditionnellement, le Québec utilise le liant d'accrochage comme technique de liaisonnement. Cependant, de nouvelles techniques voient le jour pour concurrencer ce secteur. Ainsi, dans une démarche d'amélioration continue et afin de permettre d'accroître leurs exigences qualité, certains organismes québécois envisagent l'utilisation de ces nouvelles technologies. Dans ces nouvelles technologies, il sera abordé en profondeur le cas d'une bande couvre joint en bitume.

1.4 La bande bitumineuse Denso

Denso est une entreprise allemande fondée en 1922 à Berlin. Elle est spécialisée dans la protection anticorrosion et la construction de route et de voies ferrées. Son siège étant basé à Leverkusen en Allemagne, ses produits issus de la recherche doivent donc être conforme aux législations et aux normes en vigueur dans ce pays. Ainsi, la bande bitumineuse Denso est conforme à la norme ZTV Fug-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugen in Verkehrsflächen) relative aux joints dans les zones de circulation. Dans le cadre de cette norme, les propriétés du produit sont testées suivant le programme d'essai TL Fug-StB 11 (Technische Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen) : "Spécifications techniques de livraison pour les produits d'obturation sur les surfaces de circulation". Ce document a été élaboré par des ingénieurs issus d'un même groupe de travail relatif aux joints sur les surfaces de circulation. Il s'agit d'une mise à jour (en 2011) sur le précédent TL Fug-StB 01 élaboré en 2001. Ce document contient des recommandations et spécifications

quant à l'utilisation de produit de scellement de joint pour les surfaces de circulation. Il est distingué plusieurs types de produits.

- les produits de scellement appliqués à chaud
- les produits de scellement appliqués à froid
- les joints d'étanchéité moulés
- les bandes couvre-joint en bitume

Le texte s'inspire de la norme européenne EN (European Norm) 14188 intitulée : "Spécification pour les produits de scellement de joint". Cette norme différencie aussi les types de produits utilisés mais elle ne prend pas en compte la totalité des produits sur le marché en 2015. Ainsi, la bande bitumineuse Denso ne fait pas partie des produits désignés par la norme. Pour pouvoir être pris en compte, le TL Fug-StB a transposé la norme destinée à un produit *équivalent*. Afin de se soustraire aux exigences, la bande bitumineuse doit remplir certaines conditions imposées aux produits de scellement appliqués à chaud. Ainsi, en ce qui concerne la bande couvre joint en bitume, les spécifications mettent en évidence 6 essais, dont le tableau 1.2 fait la synthèse.

Tableau 1.2 Essais suivants les recommandations TL Fug-StB

N°	TL Fug-StB	
	Type d'essai	Essai
1	Teneur en cendres	DIN 52 005
2	Point de ramollissement	DIN EN 1427
3	Pénétration au cône	DIN EN 13880-2
4	Comportement de résilience élastique	DIN EN 13880-3
5	Comportement de cintrage à froid	TP Fug-StB
6	Capacité d'expansion et d'adhésivité	DIN EN 13880-13

Il est à noter que l'indicatif DIN pour la dénomination des différentes normes suivant TL Fug-StB représente la version de la norme européenne en langue allemande (Deutsches Institut

für Normung). Lorsqu'il s'agit de la version française, le l'indicatif NF est utilisé (Norme Française).

De la même manière, les normes mentionnées pour encadrer ces essais sont issues de la normalisation européenne. Cependant, au niveau global, la standardisation des normes permet d'avoir ces normes dans le catalogue ASTM (American Society for Testing and Material). La norme ASTM D6690 intitulée "Standard Specification for Joint and Crack Sealants, Hot-Applied, for Concrete and Asphalt Pavement" est l'équivalent de la norme européenne EN 14188. *Il s'agit de recommandations concernant un contrôle qualité et non de la description des essais de performances.* La norme ASTM D5329 intitulée "Standard Methods for Sealants and Fillers, Hot-Applied, for Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements" décrit les essais à effectuer.

Voici l'équivalent ASTM au tableau 1.3.

Tableau 1.3 Essais suivant les recommandations ASTM D6690

N°	ASTM	
	Type d'essai	Essai
1	Pénétration au cône	D 5329
2	Point de ramollissement	D 36
3	Adhérence	D 5329
4	Module de résilience	D 5329
5	Dilatation après vieillissement la température	D 5329
6	Tenue au cintrage à froid	D 5329

1.4.1 Description

Les produits de liaisonnement et d'étanchéité réalisés par la marque Denso sont assez différents de ce que l'on peut voir sur le marché jusqu'à présent. En effet, les matériaux disponibles

jusqu'ici était sous forme fluide ou pâteuse. Ici, Denso propose une bande bitumineuse moulée pour assurer la jonction des deux couches d'enrobés bitumineux. Il existe plusieurs gammes de produits sous forme de bande suivant l'utilisation et les caractéristiques intrinsèques de la réparation. Cette bande reste adaptée pour des réparations de petite à moyenne ampleur. Ainsi, pour des réparations impliquant un scellement sur plusieurs dizaines de mètres linéaires, la marque Denso propose l'utilisation d'une machine pour poser un joint sous forme de pâte bitumineuse.

Nous détaillons ici ces différents produits.

1.4.2 L'apprêt d'accrochage

Tout d'abord, pour chaque réparation, il est nécessaire d'utiliser un apprêt d'accrochage avant la pose de la bande sur la surface verticale. Cet apprêt prépare le support à recevoir le matériau de réparation en améliorant l'adhésion de la bande au revêtement. Au préalable, la zone où est effectuée la réparation est nettoyée et séchée. Ensuite, on applique l'apprêt sur la surface considérée. Son rôle est aussi de lier la poussière du chantier sur les arêtes prédécoupées d'enrobés.

L'apprêt TOK-Primer SK est recommandé par la compagnie pour de meilleurs résultats. Il assure en effet la compatibilité chimique et physique des matériaux entre eux.

Certifié par la norme allemande, ce produit sèche en 5 minutes à 20°C.

1.4.3 Joints bitumineux posés à la main

Il s'agit des joints bitumineux sous forme de bande bitumineuse autocollante. Après avoir préalablement préparé la surface verticale, le joint est posé sans l'aide d'un chalumeau pour les produits SK (abréviation de selbtsklebend qui veut dire autocollant en allemand). L'adhérence est assurée par l'apprêt et la surface autocollante de la bande.

Les autres types de bande sont mis en place à chaud avec un chalumeau. C'est le cas de la bande Spezial.

1.4.3.1 Tok-Band SK

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité autocollant pour les enrobés. Il est préconisé pour les travaux de réparations sur chaussées pour former le joint de continuité entre enrobé existants et enrobés de rapiéçage, voir figure 1.2 et tableau 1.4.



Figure 1.2 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band SK (Denso (2014))

Tableau 1.4 Résultats des essais pour Tok-Band SK suivant la norme

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Point de ramollissement	°C	115	>90
Pénétration au cône	0,1 mm	41	20 - 50
Module de résilience	%	17	10 - 30
Tenue au cintrage à froid	°C	-8	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage	% et kPa	12,0 et 0,28	>10 et <1,0
Dilatation après vieillissement	%	-39,2/-38,9	*

* Constaté un changement

1.4.3.2 Tok-Band SK Mark

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité autocollant pour les enrobés avec un profil angulaire. La tenue du joint pendant la pose est ainsi augmentée. Le profil angulaire est représenté par un nez saillant sur la face supérieure. On garantit donc que le dépassement du joint sur l'enrobé lors de la réparation, voir figure 1.3 et tableau 1.5.



Figure 1.3 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band SK Mark (Denso (2014))

Tableau 1.5 Résultats des essais pour Tok-Band SK Mark suivant la norme

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Point de ramollissement	°C	115	>90
Pénétration au cône	0,1 mm	41	20 - 50
Module de résilience	%	17	10 - 30
Tenue au cintrage à froid	°C	-8	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage	% et kPa	12,0 et 0,28	>10 et <1,0
Dilatation après vieillissement	%	N.D.	*

* Constaté un changement

1.4.3.3 Tok-Band Drain SK

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité autocollant pour les couches de roulement en enrobés drainant.

Un treillis thermorésistant est intégré à la bande pour assurer la fonction drainante, voir figure 1.4 et tableau 1.6.



Figure 1.4 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Drain SK (Denso (2014))

Tableau 1.6 Résultats des essais pour Tok-Band Drain SK suivant la norme

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Point de ramollissement	°C	115	>90
Pénétration au cône	0,1 mm	41	20 - 50
Module de résilience	%	N.D.	10 - 30
Tenue au cintrage à froid	°C	N.D.	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage	% et kPa	12,0 et 0,28	>10 et <1,0
Dilatation après vieillissement	%	-39,2/-38,9	*

* Constaté un changement

1.4.3.4 Tok-Band Spezial

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité pour les enrobés à mettre en place à l'aide d'une flamme. Contrairement aux produits précédents, la pose se fait à l'aide d'un chalumeau. L'apprêt est différent mais conserve les mêmes objectifs. Ces deux produits sont conformes à la norme, voir figure 1.5 et tableau 1.7.



Figure 1.5 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Spezial (Denso (2014))

Tableau 1.7 Résultats des essais pour Tok-Band Spezial suivant la norme

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Point de ramollissement	°C	115	>90
Pénétration au cône	0,1 mm	41	20 - 50
Module de résilience	%	17	15 - 30
Tenue au cintrage à froid	°C	-8	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage	% et kPa	12,7 et 0,41	>10 et <1,0
Dilatation après vieillissement	%	N.D.	*

* Constater un changement

1.4.3.5 Tok-Band Spezial DR

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité hybride, à chauffer ou autocollant, sous forme de profilé angulaire. Il utilise le même apprêt que le Tok-Band Spezial. Il convient particulièrement comme bande d'étanchéité bitumineuse aux jonctions des angles, voir figure 1.6 et tableau 1.8.



Figure 1.6 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band Spezial DR (Denso (2014))

Tableau 1.8 Résultats des essais pour Tok-Band Spezial DR suivant la norme

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Point de ramollissement	°C	115	>90
Pénétration au cône	0,1 mm	41	20 - 50
Module de résilience	%	17	15 - 30
Tenue au cintrage à froid	°C	-8	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage	% et kPa	12,7 et 0,41	>10 et <1,0
Dilatation après vieillissement	%	N.D.	*

* Constater un changement

1.4.3.6 Tok-Band T

Il s'agit d'un joint de dilatation et d'étanchéité pour application spéciale, disposant de caractéristiques d'adhérence et de dilatation élevée. C'est aussi un joint hybride à chauffer ou autocolant. Il convient parfaitement pour des jonctions soumises à de fortes contraintes comme pour l'établissement de voies ferrées. Cette bande satisfait aussi les exigences de la norme TL bitFug 82 sur les produits de scellement bitumineux, voir figure 1.7 et tableau 1.9.



Figure 1.7 Profil de la bande bitumineuse Tok-Band T (Denso (2014))

Tableau 1.9 Résultats des essais pour Tok-Band T suivant les normes

Essais	Unités	Résultats	Exigences
Densité	g/cm^2	1,313	**
Point de ramollissement	°C	115	>85
Pénétration au cône	0,1 mm	N.D.	20 - 50
Module de résilience	%	12	10 - 60
Tenue au cintrage à froid	°C	N.D.	<0
Capacité de dilatation et d'accrochage (-10°C)	mm	2	2
Dilatation après vieillissement	%	N.D.	*
Stabilité dimensionnelle à 45°C pendant 24h	mm	1,5	<4,5

* Constater un changement

** à indiquer par le fabricant

1.4.4 Joints bitumineux posés à la machine

1.4.4.1 La machine de pose : TOKOMAT

La machine permet la pose d'un mastic servant de joint bitumineux entre deux couches d'enrobé, voir figure 1.8. Il n'y a plus ici la présence de bande bitumineuse moulée et préfabriquée. Cette technique est destinée aux chantiers dont les dimensions sont importantes et les mètres linéaires à couvrir non négligeables. De plus, elle est très utile lorsque la couche de surface a été rabotée et que les arêtes possèdent de grandes irrégularités rendant impossible la pose d'une bande bitumineuse. Cet appareil est conforme aux exigences de la norme allemande ZTV Fug-Stb. Le mastic mis en place est décrit à la section suivante.



Figure 1.8 Machine Tokomat en fonctionnement (Denso (2014))

1.4.4.2 Le matériau de pose : TOKOMAT - Riegel

Le produit que met en place la machine Tokomat est mastic ou liant enrichi de matières synthétiques. À l'état solide au repos, le mastic est chauffé pour pouvoir être appliqué à l'état souple. Ce produit est conforme à la norme allemande ZTV Asphalt StB et ZTV Fug-StB. Lors de la

mise en oeuvre, le produit est donc chauffé entre 80 et 100°C. Les caractéristiques du matériau satisfont aux exigences de la norme mais nous ne développerons pas cela ici.

1.5 Existe-t-il d'autres alternatives équivalentes ?

Pour l'instant, il n'existe pas réellement d'équivalent à la bande bitumineuse de liaisonnement Denso. Cependant on peut retrouver des matériaux dont la finalité est la même mais qui ne se présente pas sous forme de bande bitumineuse.

1.5.1 Crafcoc

Ainsi, comme le produit Denso applicable à la machine Tokomat, des équivalents sont disponibles sous d'autres marques. Ils utilisent le même procédé avec une machine pour l'aide à la pose d'un mastic de liaisonnement. Crafcoc fait donc parti de ces entreprises qui concurrence Denso sur ce marché. Le principe de mise en oeuvre est similaire à la machine Tokomat, d'après Roy (2009). Cependant ces procédés sont plus généralement destinés aux constructions neuves pour liaisonner deux bandes d'enrobés lors d'une construction de chaussée, voir figure 1.9.



Figure 1.9 Machine de pose d'adhésif pour joint en fonctionnement (source : Crafcoc)

CHAPITRE 2

OBJECTIFS PRINCIPAUX DU RAPPORT

Ce rapport souhaite répondre à plusieurs objectifs formulés de la part de son souscripteur. Ceux-ci sont essentiellement relatifs aux différents comportements mécaniques des matériaux de réparation évoqués précédemment.

Tout d'abord, il faut définir les caractéristiques mécaniques que l'on veut mettre en évidence afin de comparer les matériaux. Ces caractéristiques identifiées, il faut déterminer les essais correspondants et établir un protocole expérimental détaillé.

Ensuite, il faut évaluer, à proprement parlé, les matériaux suivant ces protocoles expérimentaux. Afin d'être le plus vraisemblables possible, les conditions de laboratoire doivent être, dans la mesure du possible, équivalentes aux conditions de chantier. Ceci est valable pour l'élaboration des éprouvettes tout comme les conditions d'essai. Les protocoles expérimentaux doivent être scrupuleusement identiques pour chacun des matériaux à comparer afin de ne pas biaiser les résultats.

Une fois évalués, les matériaux seront comparés en prenant en compte toutes les données connexes à l'essai, quitte à effectuer un traitement des données ultérieurement.

Enfin, en s'appuyant sur ce comparatif, une recommandation finale sera proposée quant au choix du matériau adéquat. Une analyse critique sur la méthode sera aussi fournie. Le but étant d'indiquer les éventuelles défaillances afin d'optimiser la méthode.

Ainsi, le reste du rapport s'organise suivant quatre autres chapitres, une conclusion et les recommandations. Un chapitre, chapitre 3, énonce le programme d'essais. Un deuxième chapitre, chapitre 4, décrit en détail la procédure des essais. Un autre chapitre, chapitre 5, présente les résultats bruts obtenus et propose une discussion. Enfin, le dernier chapitre, chapitre 6, présente une analyse et un traitement des résultats afin de pouvoir les soumettre à la comparaison.

CHAPITRE 3

PROGRAMME D'ESSAIS

Dans le cadre de ce projet, nous allons effectuer deux essais en laboratoire afin d'évaluer deux propriétés fondamentales de la bande bitumineuse. Il s'agit de deux essais qui identifient deux modes de dégradations du matériau influençant sa durabilité en phase d'exploitation. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats des essais sur éprouvette munie de la technique traditionnelle à base de liant d'accrochage.

Comme il a été évoqué dans l'introduction, la jonction entre deux revêtements à l'endroit d'une réparation de la chaussée est un point critique. En effet, elle permet d'assurer la continuité du revêtement. On parle d'une continuité physique afin de garantir, par exemple, une bonne étanchéité à l'eau.

Les tests seront tous effectués sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire. Pour les tests d'arrachement, les tests seront faits sur des éprouvettes cylindriques où le joint sera en position horizontale. Pour ce qui est des tests de perméabilité, les essais se feront sur des éprouvettes cylindriques dont le joint sera soit en position horizontale ou verticale. De plus, les éprouvettes seront testées avant et après une séquence de CGD.

3.1 Hypothèses

Le programme d'essais présenté se base sur les hypothèses suivantes.

Mise en œuvre : il est supposé que les travaux de réparation sont exécutés en bonne et due forme.

Enrobés : il est supposé que la formulation des enrobés en place et de rapiéçage ne jouent pas un rôle, à aucun moment.

Dégradations : il est supposé que les seuls agents de dégradations qui influencent les propriétés mécaniques du joint sont les CGD, les sollicitations dues au trafic routier et les sollicitations dues aux mouvements thermiques (retrait ou dilatation)

3.2 Essai d'arrachement par traction mécanique

L'essai d'arrachement se fait à l'aide d'une presse hydraulique, voir figure 3.1.



Figure 3.1 Presse MTS 858 mini Bionix

Pour ce qui est des paramètres précis du test effectué, après concertation, il a été décidé de prendre 0,1 mm/min comme vitesse de traction.

Après la mise en place de casques compatibles avec l'utilisation de la presse sur les extrémités de l'éprouvette avec de la colle époxy, l'échantillon est installé à température ambiante sur la presse. Le programme est ainsi lancé en déterminant la vitesse de déplacement du piston. Le logiciel fait une acquisition automatique de la force nécessaire pour effectuer ce déplacement.

3.3 Essai d'étanchéité par succion confinée

Pour cet essai, l'éprouvette est placée dans une cellule confinée. L'éprouvette est enveloppée d'une membrane en latex sur sa surface radiale. À sa base, elle repose sur une pierre poreuse et un support qui applique une force de succion dirigée par une pompe mécanique. À son extrémité haute, l'éprouvette supporte une autre pierre poreuse et une tête qui achemine l'eau qui évaluera l'étanchéité de l'éprouvette. L'essentiel de la force en jeu ici est la contrainte appliquée par la pompe qui entraîne l'eau du haut vers le bas de l'échantillon. De plus, ce dispositif est placé dans une cellule où l'on applique une contre-pression positive pour que les seules surfaces mises en jeu pour la perméabilité soient les bases (ou extrémités). En effet, cette pression positive va confiner l'éprouvette grâce à la membrane en latex qui va venir épouser la forme et les différentes aspérités de l'éprouvette afin d'éviter que de l'eau ne percole entre la membrane et l'éprouvette, voir figure 3.2.

L'acquisition des données se fait manuellement. Concrètement, on mesure à l'aide d'un chronomètre le temps que met une burette de 100 mL d'eau distillée à s'écouler au sein de l'échantillon. Cette opération est répétée 3 à 4 fois d'affilée pour plus de précision.

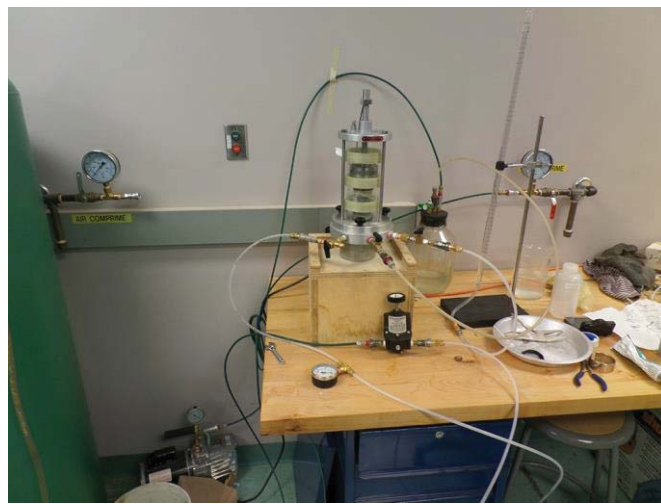


Figure 3.2 Vue d'ensemble du dispositif de l'essai de perméabilité

3.4 Tableau récapitulatif

Afin de réduire le risque d'erreur, chaque essai sera effectué sur trois ou quatre éprouvettes ayant la même provenance.

Les entrées du tableau sont de la forme :

$$X_{i,j,k} \quad (3.1)$$

où

X représente le type de joint utilisé (B pour la bande bitumineuse et L pour le liant d'accrochage, en position horizontale ; B' pour la bande bitumineuse et L' pour le liant d'accrochage, en position verticale),

i représente le type d'essai (1 pour l'essai d'arrachement et 2 pour l'essai d'étanchéité),

j représente la présence ou non de CGD (1 avant CGD et 2 après CGD) et

k indique quel est l'échantillon parmi les trois ayant la même provenance. Cet indicateur est non négligeable car il indique la position de carottage sur la plaque de provenance, voir la section 4.4.1.

En résumé, le tableau récapitulatif 3.1 nous indique 16 conditions d'essais différentes suivant le type de joint utilisé, la caractéristique de l'éprouvette, la présence ou non de CGD au sein du joint et le type d'essai réalisé.

Le programme d'essais suggère donc la réalisation de 16 conditions d'essais multipliés par 4 (soit le nombre d'éprouvettes ayant la même provenance). Ainsi, le programme d'essai comporte 64 protocoles expérimentaux.

Tableau 3.1 Récapitulatif du programme d'essais

Essais	Caractéristiques	Avant cycle de gel-dégel		Après cycle de gel-dégel	
		Liant	Bande	Liant	Bande
Arrachement	Joint horizontal	$L_{1,1,k}$	$B_{1,1,k}$	$L_{1,2,k}$	$B_{1,2,k}$
	Joint horizontal	$L_{2,1,k}$	$B_{2,1,k}$	$L_{2,2,k}$	$B_{2,2,k}$
Étanchéité	Joint horizontal	$L_{2,1,k}$	$B_{2,1,k}$	$L_{2,2,k}$	$B_{2,2,k}$
	Joint vertical	$L_{2,1,k}$	$B_{2,1,k}$	$L_{2,2,k}$	$B_{2,2,k}$

avec $k = 1, 2, 3, 4$

CHAPITRE 4

PROCÉDURE DES ESSAIS

4.1 Matériaux utilisés

En laboratoire, le but est de réaliser une éprouvette susceptible de correspondre au mieux aux conditions réelles de chantier. Sur chantier, il suffit de prélever une carotte qui fera office d'éprouvette. Dans cette section, nous parlerons des éprouvettes confectionnées en laboratoire.

Ainsi, une éprouvette type sera composée de l'enrobé existant et de l'enrobé de rapiéçage séparé par la bande bitumineuse ou le liant d'accrochage. Cette séparation sera soit dans le sens transversal de l'éprouvette soit dans le sens longitudinal. On parlera respectivement d'un joint horizontal ou d'un joint vertical, voir 4.16. Cette différence s'observe suivant si l'on procède à l'essai d'arrachement ou l'essai d'étanchéité.

En laboratoire, il a été décidé de fabriquer un enrobé de surface classique de type ESG-10 (enrobé semi-grenu). C'est en effet l'enrobé de surface le plus courant que l'on rencontre au Québec avec près de 58% de part sur l'ensemble du territoire du Québec (Paradis (2008)). La dénomination de l'enrobé vient de la norme 4202 du Ministère des Transports du Québec (MTQ) qui correspond à un enrobé semi-grenu avec des granulats de dimension nominale maximale, ou GNM, de 10 mm. Cet enrobé dense possède une courbe granulométrique qui se situe sous la courbe de masse volumique maximale. De fait, il possède une surface grenue et très imperméable, voir tableau 4.1.

La recette utilisée pour la confection des éprouvettes est détaillée ci-dessous.

4.1.1 Granulat

La structure granulaire de l'enrobé se décompose en trois parties identifiées par des fractions granulaires. Il y a des agrégats grossiers compris entre 5 et 10 mm de grosseur puis des agrégats

Tableau 4.1 Granulométrie type des ESG-10

Tammis (mm)	Passant (%)	
	Minimum	Maximum
14	100	100
10	92	100
5	50	65
*2,5	46,1	46,1
*1,25	30,7	36,7
*0,630	22,8	26,8
*0,310	18,1	18,1
0,160	—	—
0,080	4	10

* zone de restriction

plus fins, appelé criblure, compris entre 0 et 5 mm de grosseur et enfin il y a le filler compris entre 0 et 80 μm .

4.1.2 Bitume

Pour ce type d'enrobé, toutes les classes de bitumes peuvent être utilisées. Ainsi, il a été décidé d'utiliser un bitume standard de type PG 58-28 (performance grade).

Cette détermination désigne la classe de performance du bitume issu de la méthode SHRP. Elle se différencie de la désignation basée sur l'indice de pénétrabilité, comme en France par exemple. La nomenclature standard est donc de la forme PG H-L. H correspond à la température haute limite où le bitume possède une cohésion suffisante pour résister à l'orniérage. L correspond à la température basse limite où le bitume est encore capable de résister à la fissuration thermique. Ces températures sont déterminées suivant 2 essais. Pour déterminer H on utilise le rhéomètre à cisaillement dynamique ou DSR (dynamic shear rheometer). Pour ce qui est de L on utilise le rhéomètre à flexion de poutre ou BBR (bending beam rheometer).

4.2 Formulation de l'enrobé

La formule utilisée pour la confection de l'enrobé est donnée au tableau 4.2.

Tableau 4.2 Granulométrie de l'enrobé élaboré

Tamis en mm	5-10 St-Phil %	0-5 Lavée %	Filler %	Fuseau %
14	100	100	100	100
10	87	100	100	92-100
5	6	94	100	52-65
2.5	2	58	100	46.1
1.25	2	33	100	30.7-36.7
0.63	2	19	100	22.8-26.8
0.315	2	11	100	18.1
0.16	2	8	98	5-17
0.08	1.3	5	86	4-10
Proportion utilisée	47%	50%	3%	

^A St-Philippe

^B Hummer

Chaque fournée prépare une plaque d'enrobé. Cette plaque possède les dimensions suivantes : 500x180x100 (en mm). Ainsi, il faut prévoir un volume V d'enrobé équivalent à 9 dm^3 .

$$L.l.h = V \quad (4.1)$$

La densité maximale du mélange (D_{mm}) est fixé par la recette : $D_{mm} = 2,524$

On peut ainsi calculer la masse maximale du mélange (M_{mm}) : $M_{mm} = 22,720 \text{ kg}$.

$$V.D_{mm} = M_{mm} \quad (4.2)$$

La teneur en vide voulue est de 5%. Ainsi la masse réelle du mélange (M_{relle}) équivaut à 21,584 kg.

$$M_{mm} \cdot (1 - 0,05) = M_{relle} \quad (4.3)$$

La formulation donne une teneur en bitume de 5,3% au sein du mélange. Ainsi il faut compter 1,144 kg de masse de bitume (M_{bitume}).

$$\frac{5,3}{100} \cdot M_{relle} = M_{bitume} \quad (4.4)$$

La masse totale de granulats ($M_{granulats}$) équivaut donc à $M_{granulats} = 20,440$ kg.

$$M_{relle} - M_{bitume} = M_{granulats} \quad (4.5)$$

La formulation donne une masse de granulats grossier (M_{5-10}) de 47% de la masse totale de granulats, soit : $M_{5-10} = 9,607$ kg.

$$M_{granulats} \cdot 47\% = M_{5-10} \quad (4.6)$$

De la même manière, avec 50% en granulats fins et 3% en filler, nous avons la masse de granulats fins $M_{0-5} = 10,220$ kg et la masse de filler $M_{0-0,08} = 0,613$ kg.

$$M_{granulats} \cdot 50\% = M_{0-5} \quad (4.7)$$

$$M_{granulats} \cdot 3\% = M_{0-0,08} \quad (4.8)$$

On regroupe ces données dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Récapitulatif de la formulation de l'enrobé

	5-10	0-5	Filler	Bitume	Mélange
Masse en g	9607	10220	613	1144	21584

4.3 Élaboration du système de réparation

Le système réalisé se compose d'une couche d'enrobé, du matériau de réparation et d'une autre couche d'enrobé.

4.3.1 Confection des plaques d'enrobés en laboratoire

Au préalable, les matériaux sont stockés dans un four, voir figure 4.1, à 150°C, la veille de l'élaboration de la plaque. Une fois la plaque réalisée, elle est sciée quelques jours plus tard afin de respecter un temps de cure. L'opération de sciage se fait en présence d'eau, il faut donc respecter de nouveau un temps de cure pour que l'eau n'influence pas l'enrobé.

4.3.1.1 Malaxage

Le malaxeur, voir figure 4.2, est préchauffé à la température de malaxage voulue. Ici, elle est de 150°C.

Dans le malaxeur, on ajoute, dans l'ordre, les agrégats grossiers, les agrégats fins et le filler. Tous ces composants sont pesés soigneusement afin de respecter les proportions de chacun.



Figure 4.1 Four pour matériaux d'enrobés bitumineux



Figure 4.2 Malaxeur pour enrobés bitumineux

Cette phase fait chuter la température du mélange à 135°C car le malaxeur est ouvert et les matériaux à l'air libre. Le malaxeur doit donc chauffer le mélange à la bonne température

(150°C). Une fois que la température est satisfaisante, on introduit le bitume. Le malaxage se déroule sur deux cycles de 45 secondes.

Une attention particulière devra être prise pour vérifier que les fines ne se sont pas agglomérées dans le fond de l'appareil.

4.3.1.2 Compactage

La confection des plaques d'enrobés suit les recommandations de la direction du laboratoire des chaussées du Ministère des Transports du Québec LC 26-400 : "Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées)" pour le compactage. On utilise ici un compacteur de plaques BBPAC qui est conforme à la norme française F EN 12697-33 pour compacter les plaques d'enrobés. Ce compacteur entre dans la liste conforme aux matériels du laboratoire des ponts et chaussées (MLPC), voir figure 4.3.



Figure 4.3 Compacteur MLPC de plaques d'enrobés

Le compactage est réalisé par l'application d'une pression radiale de la roue sur la plaque. La roue effectue donc plusieurs passages sur l'échantillon afin d'obtenir le résultat voulu, voir figure 4.4. Les passes de la roue suivent un séquençage précis suivant l'épaisseur de la couche d'enrobé à compacter, voir figure 4.5.



Figure 4.4 Compactage d'un échantillon

Hauteur plaque 50 mm. DÉBUT=90mm
Hauteur plaque 100 mm. DÉBUT=160mm
Compactage Fort (Plaques de 500 X 180X ---mm.)

Nombre de passes				Pression pneu (Bars)	Force véto (Kx)	Départ	Position de la roue	Véto	Hauteur plaque 50 mm	Hauteur plaque 100 mm
Position Roue										
Avant 1er	Arrière 2e	Centre 3e								
Cumulé	Cumulé	Cumulé								
1	1			6	1,5	droite	1	bloqué	65	130
2		1								127
3			1							
4	1									125
5		1							62	123
6			1							
7	2	4	2	4	1	3			6	5
8	2	6	2	6	1	4			3	libre
9	4	10	4	10	2	5			50	120
10	4	14	4	14	2	5			59	118
10	8	18	8	18	4	10			56	113
11	8	26	8	26	4	14			53	107
12	4	30	4	30	2	14			51	106
12	4	34	4	34	2	14			50	106
13	2	36	2	36	1	17				
14	2	38	2	38	1	18				
15	2	40	2	40	6	24	Roue d'acier	2	bloqué	*

Figure 4.5 Séquençage des passes de la roue du compacteur pour le compactage des plaques

L'avantage c'est que les plaques réalisées sont représentatives des conditions de chantier pour le matériau en ce qui concerne l'homogénéité et le pourcentage de vides.

4.3.1.2.1 Effet de paroi

Il est important ici de mentionner un phénomène qui est non négligeable lorsque l'on compacte des plaques d'enrobés : l'effet de paroi. En effet, ce phénomène est lié à l'interaction entre les grains d'un matériau granulaire (ici l'enrobé bitumineux) mis en contact avec n'importe quel type de paroi. Ce phénomène est présent pour tous les types de matériaux granulaires (comme le béton par exemple). Il explique aussi les notions fondamentales de combinaisons granulaires. Selon Perraton *et al.* (2007), lorsqu'un gros granulat est incorporé dans un volume infini de granulats fins, il perturbe localement l'agencement des particules fines en créant des vides plus importants, voir figure 4.6.

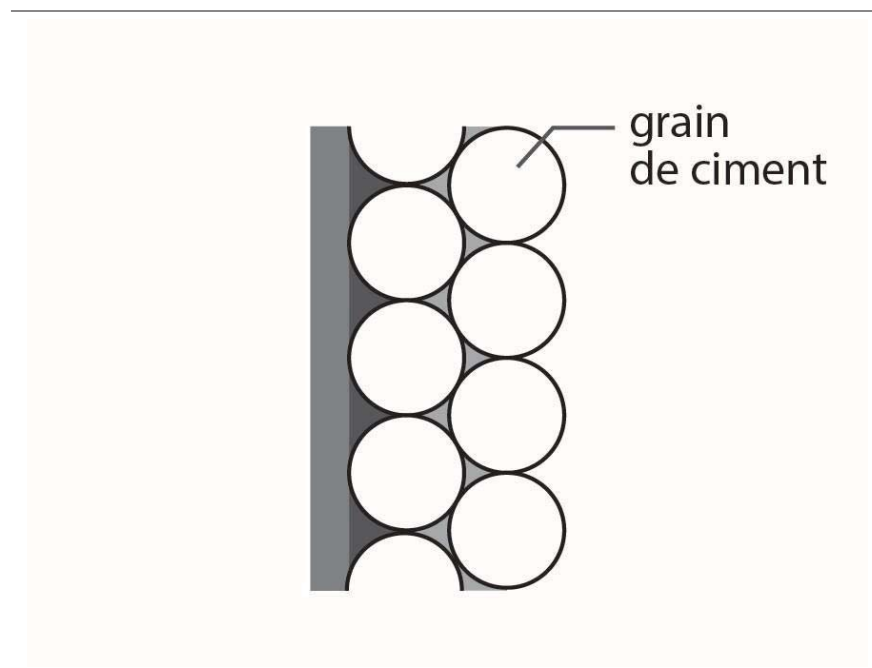


Figure 4.6 Effet de paroi sur l'agencement des particules d'un matériau granulaire (béton ici)

Si l'on considère que le gros granulat possède un rayon infini devant les particules fines, il apparaît localement comme rectiligne. C'est cette analogie que l'on fait ici.

Afin de ne pas être influencés, nous considérons que les bords de la plaque ne sont pas utilisables et donc pas échantillonnables sur une profondeur d'environ 2 cm.

4.3.1.3 Vérification de la densité maximale du mélange

L'enrobé réalisé est vérifié en recalculant la densité maximale du mélange, ou D_{mm} , du matériau. La méthode LC 26-045 décrit la procédure de l'essai. Pour évaluer la D_{mm} , l'essai est effectué sur la plaque de référence qui représente l'enrobé sans réparation. Encore une fois, on suppose que la méthode d'élaboration d'enrobé ne diffère pas d'une gâchée à l'autre. Un échantillon d'enrobé est donc prélevé sur la gâchée à évaluer. L'enrobé y est décohesionné dans un bac. Le tout est mis dans pot auquel on ajoute de l'eau à 25°C. Ensuite le pot est placé sur une plaque vibrante pendant 10 minutes. Au préalable, la pression est abaissée au sein du pot pendant 1 minute par aspiration. Ensuite le pot est entièrement rempli d'eau. Une attention particulière est à prendre pour qu'aucune bulle d'air ne soit présente dans le pot. Le tableau 4.4 compile les résultats des pesées pour le calcul de la D_{mm} .

Tableau 4.4 Résultats des pesées pour D_{mm}

	M_1 en g	M_2 en g	M_3 en g	Température en °C	Pression en mm de mercure
Plaque de référence	1454,6	5664,5	6545,3	25	19

avec

M_1 = masse de l'échantillon sec

M_2 = masse du pot + plaque + eau

M_3 = M_2 + échantillon

Afin de calculer la D_{mm} , il suffit de faire le rapport suivant :

$$D_{mm} = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \quad (4.9)$$

Ainsi, on obtient :

$$D_{mm} = 2,535 \quad (4.10)$$

4.3.1.4 Calcul de la densité brute

On calcule la densité brute (D_{brut}) du mélange suivant la méthode LC 26-040. Une fois la plaque carottée, l'échantillon est pesé à sec, M_{seche} , puis on le plonge dans l'eau. Au bout de quelques heures de trempage, on le pèse dans l'eau, $M_{immergee}$, voir figure 4.7. Ensuite on le sort de l'eau, on le sèche en surface et on fait une dernière pesée, M_{sss} . L'eau utilisée doit être à 25°C. On différencie deux types d'éprouvette suivant les deux types d'essais à effectuer. En effet, leurs dimensions varient suivant l'une ou l'autre ce qui peut affecter la teneur en vide. Le tableau 4.5 compile les pesées pour le calcul de la D_{brut} .

Tableau 4.5 Résultats des pesées pour D_{brut}

Éprouvette destinée à	M_{seche} en g	$M_{immergee}$ en g	M_{sss} en g	Température en °C
Traction	1060,9	606,5	1062,9	25,4
Perméabilité	480,5	275,3	481,1	25,3

La D_{brut} s'obtient ensuite en faisant le rapport :

$$D_{brut} = \frac{M_{seche}}{M_{SSS} - M_{immergee}} \quad (4.11)$$

Ainsi, on obtient pour l'échantillon de traction :

$$D_{brut} = 2,324 \quad (4.12)$$

et pour l'échantillon de perméabilité :

$$D_{brut} = 2,335 \quad (4.13)$$

Il faut noter ici que les données de D_{brut} sont issues d'échantillons uniquement carottés et non sciés ou rabotés. Pour les carottes destinées aux essais d'arrachement, les calculs de la densité brute n'ont pas paru nécessaires. Cependant, pour les éprouvettes destinées aux essais de perméabilité, la densité brute a été calculée, pour chacune des éprouvettes. Ces éprouvettes sont les celles utilisées lors des essais, elles sont par conséquent plus petites en terme de hauteur (50 mm). Un récapitulatif de ces densités est donné plus tard.



Figure 4.7 Photo du dispositif de pesée de l'échantillon lorsqu'il est immergé
Le panier est relié par un câble à la balance. On plonge le panier dans le bac rempli d'eau à 25°C. On tare et ensuite on vient poser l'échantillon dans le panier.

4.3.2 Sciage des plaques

Une fois la plaque de 10 cm réalisée, on scie la face qui a été en contact avec la roue de compactage car elle est très irrégulière. Ensuite, la plaque est sciée à mi-hauteur dans le plan horizontal. Une plaque réalisée produit 2 demi-plaques. Une opération de rabotage est aussi nécessaire pour faire passer la demi-plaque dans le moule. La figure 4.8 montre la coupe transversale de deux plaques.



Figure 4.8 Deux coupes transversales de plaques *sandwich* (de gauche à droite : bande et liant) posées sur une demie plaque

4.3.3 Application du matériau de réparation

Sur une demi-plaque, on applique l'un des deux produits de réparations (bande ou liant) sur la surface sciée (reproduction des conditions de chantier).

Bande bitumineuse : sur la surface sciée, on applique l'apprêt, puis la bande est posée

Liant d'accrochage : sur la surface sciée, on applique le liant d'accrochage

4.3.3.1 Temps de pose

Lorsque les produits (liant ou apprêt) sont appliqués sur la surface sciée, il faut respecter un temps de pose pour pouvoir continuer la procédure. Ici, le temps de pose de l'apprêt est de 20 minutes. Passé ce délai, la bande bitumineuse, chauffée préalablement, est posée sur la surface sciée, voir figure 4.9.

On note que seulement trois bandes ont été appliquées, ce qui ne couvre pas entièrement la surface. Cependant, les carottes prélevées sur les échantillons ne se trouvent jamais aux bords car il y a un effet de paroi qui perturbe le pourcentage de vide dans ces zones.



Figure 4.9 La bande est posée après 20 minutes de séchage de l'apprêt.

En ce qui concerne le liant d'accrochage à base d'émulsion, nous avons suivi la méthode d'essai LC 25-011 : "Préparation d'éprouvettes de laboratoire afin d'évaluer la force de liaison d'une émulsion d'accrochage".

Ainsi, comme recommandé dans l'ouvrage, le volume V_l de liant à appliquer est calculé.

Au préalable, un taux d'application T est fixé de : $0,20\text{L}/\text{m}^2$

$$V_l = \frac{S \cdot T}{\% \text{ bitume}} \quad (4.14)$$

Avec

$$S : \text{surface de la plaque} = 0,5 \cdot 0,18 = 0,09 \text{ m}^2$$

$$T = 0,20\text{L}/\text{m}^2$$

$$\% \text{ bitume} = 0,55$$

Le volume V_l vaut donc 33 mL.

À l'aide d'une seringue, on mesure précisément ce volume que l'on applique sur la totalité de la surface.

Enfin, il faut laisser sécher la surface enduite pendant 120 minutes avec un ventilateur.

4.3.4 Application de la dernière couche d'enrobé

La demi-plaque accompagnée de son matériau de réparation sont donc placés dans le compacteur BBKA, voir figure 4.10.



Figure 4.10 La demi-plaque est prête à recevoir la nouvelle couche d'enrobé

Une fois le système en place, on coule le nouvel enrobé afin qu'il soit compacté, voir figure 4.11. Cet enrobé est en tout point identique au précédent afin de n'avoir aucun autre facteur influençant le système à part le matériau de réparation.



Figure 4.11 Le nouvel enrobé est compacté

Le séquençage des passes de la roue est adapté à l'épaisseur de l'enrobé appliqué ici. En effet, en comparaison avec les plaques précédentes, la hauteur d'enrobé à compacter est deux fois plus faible (5 cm contre 10 cm).

4.3.5 Échantillon final

On obtient donc le système de réparation sous forme de plaque comme le montre la figure 4.12.

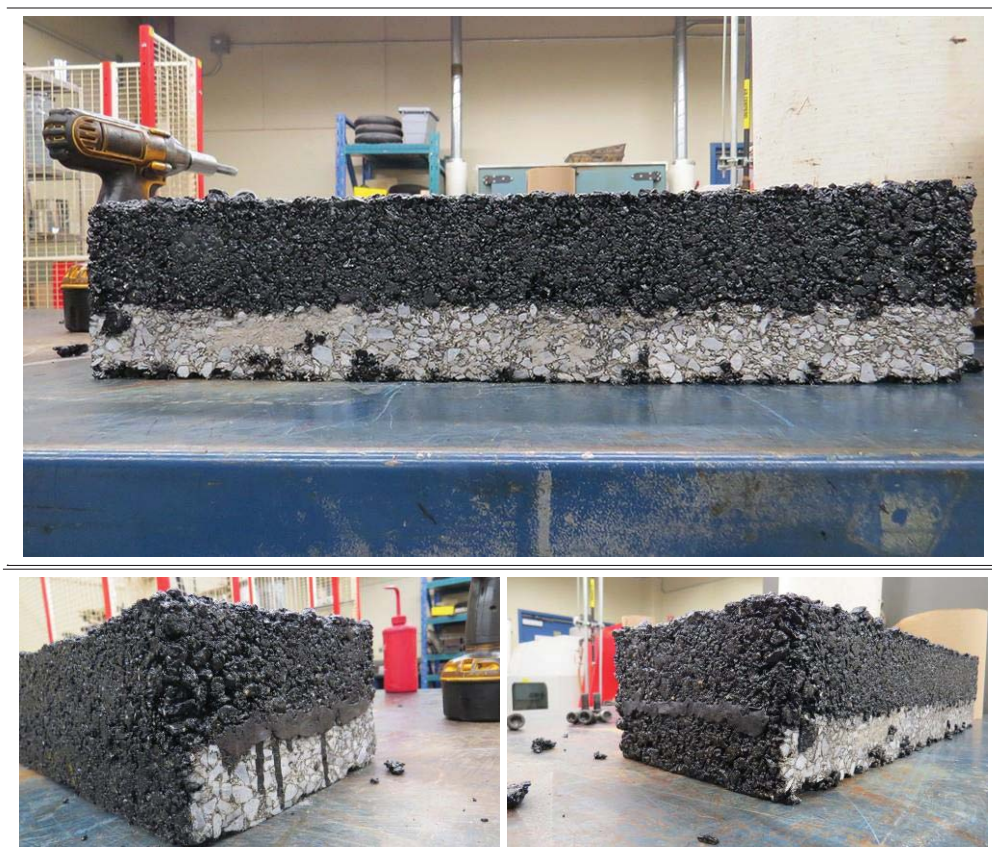


Figure 4.12 Échantillon final

4.4 Confection des éprouvettes en laboratoire

Après avoir observé un temps de cure, nous pouvons procéder au carottage de l'échantillon pour réaliser les éprouvettes. Elles sont cylindriques et de dimensions différentes suivant l'essai effectué. Chaque plaque d'enrobé produit 4 éprouvettes pour les essais d'arrachement et 8 éprouvettes pour les essais d'étanchéité, voir figure 4.14.

4.4.1 Carottage

Comme évoqué précédemment, les effets de paroi sont importants au sein de la plaque d'enrobé, ainsi, il faut prendre en compte le fait que les éprouvettes carottées au milieu de la plaque seront de meilleure qualité. De plus, suivant toutes les faces de la plaque, une marge de 2 cm devra être respectée où aucun carottage ne devra y être effectué. Ces précautions sont prises pour prévenir un pourcentage de vide trop important. On différencie donc les éprouvettes suivant le test qu'elles vont subir, voir le tableau 4.6 et les figures 4.13 et 4.14.

Tableau 4.6 Différence de carottages

	Bande bitumineuse	Liant d'accrochage
Diamètre en mm	85	50
Longueur en mm	100	100 ou 180
Direction de carottage	Verticale	Verticale ou Latérale
Nombre de carottes par plaques	4	8
Nombre de plaques nécessaires	4	2



Figure 4.13 Plaques carottées pour les essais d'arrachement

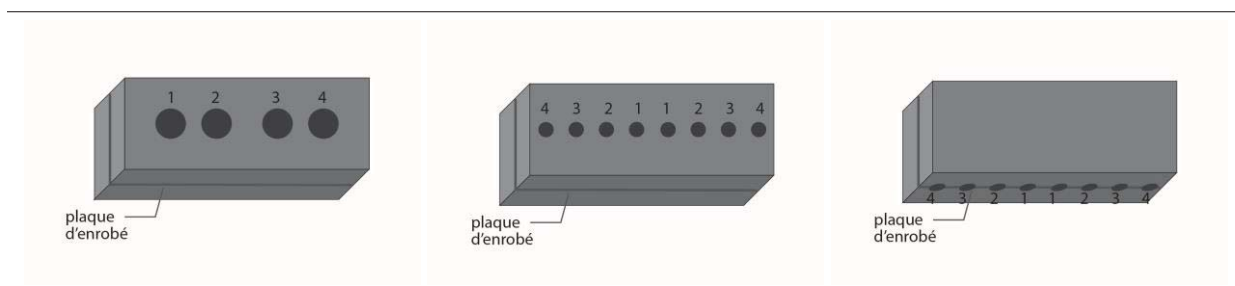


Figure 4.14 Localisation des carottes sur les plaques suivant le type d'éprouvette (de gauche à droite : traction, perméabilité joint horizontal, perméabilité joint vertical)

4.4.2 Sciage

La hauteur des éprouvettes doit être redimensionnée pour éviter les effets de paroi. On effectue donc un sciage sur chacune des éprouvettes des deux côtés de celles-ci afin qu'elles coïncident aux hauteurs déterminées. La figure 4.15 illustre l'opération de sciage en laboratoire et la figure 4.16 schématise les éprouvettes finales.



Figure 4.15 Sciage d'une face de la carotte

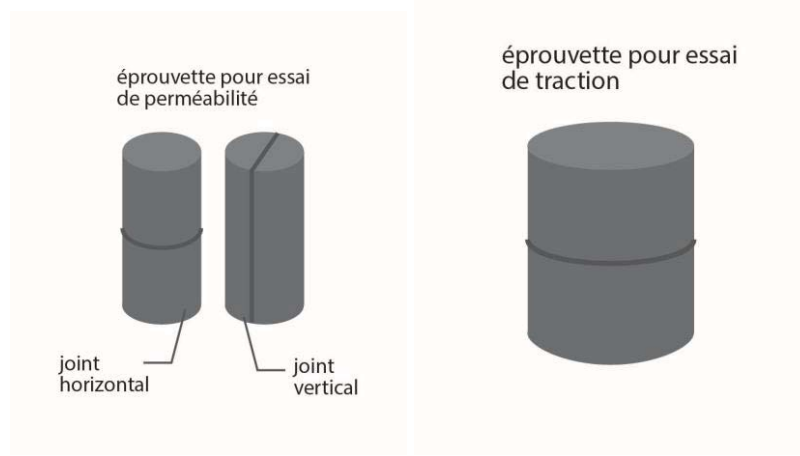


Figure 4.16 Schémas des différentes éprouvettes finales

4.4.3 Meulage

Enfin, après le sciage, une dernière opération est effectuée afin d'obtenir des éprouvettes avec un fini optimal. Le meulage permet de polir les faces horizontales des éprouvettes cylindriques. Ainsi, les éprouvettes peuvent être manipulées pour recevoir des casques. De plus, on garantit le parallélisme des deux surfaces aux extrémités.

4.5 Description des essais

4.5.1 Essais d'arrachement

Une fois les éprouvettes obtenues et prêtes à être testées, il faut leur appliquer des casques d'aluminium qui serviront à l'essai d'arrachement (ou aux CGD). Ces casques font partie du protocole et une attention particulière doit être prise en ce qui concerne leur installation. Ces éléments sont placés sur les deux surfaces horizontales de l'éprouvette. Ce sont sur ces casques que la presse effectuera la contrainte négative de traction. L'opération de meulage sert à réduire au maximum les aspérités et permettre à l'échantillon d'être conforme. En effet, les faces horizontales doivent être parallèles pour éviter de créer une traction différentielle lors de l'essai, ce qui influencerait évidemment les résultats.

Pour installer ces casques, nous utiliserons de la colle époxy. Ce matériau est un mélange d'une résine et d'un durcisseur dont les dosages doivent être précis. Cette colle est très performante et sert donc de liaison entre l'éprouvette et le casque.

Pour réaliser cette liaison, nous utilisons un banc de collage fabriqué à cet effet, voir figure 4.17.

Ce banc de collage est utilisé afin d'assurer l'alignement parfait lors de la mise en place de l'éprouvette.

Pour s'assurer d'un collage optimal, l'éprouvette doit être laissée pendant un temps de cure minimal de 4 heures sur le banc à une pression de 40 N.



Figure 4.17 Banc de collage utilisé

Il est à noter que seulement un casque est installé sur le banc, l'autre est installé directement avec la presse hydraulique, voir figure 4.18. Les temps de pose sont les mêmes que pour le banc de collage.



Figure 4.18 Presse hydraulique utilisée pour coller les autres casques

Une fois l'éprouvette casquée, voir figure 4.19, l'éprouvette est entreposée dans un bain de sable. Cette technique est utilisée afin d'éviter les déformations dues au fluage naturel de l'en-



Figure 4.19 L'éprouvette est prête à être testée et entreposée dans un bain de sable pour prévenir les déformations dues au fluage

robé lorsqu'il se trouve en porte à faux. On peut donc désormais procéder à l'essai de traction en tant que tel.

L'éprouvette est placée dans la presse, vissée aux deux extrémités à deux vérins. L'un est fixe et l'autre est mobile.

Pour contrôler le bon déroulement de l'essai, on vérifie que la vitesse d'arrachement est constante et qu'elle correspond bien à la valeur imposée (0,1 mm/min). De plus, on mesure la force résistante au sein de l'éprouvette.

L'acquisition se fait de manière très précise tous les dixièmes de seconde. C'est un capteur sur le vérin qui permet l'acquisition. Au final, on mesure trois grandeurs différentes :

- la force résistante dans l'éprouvette en Newton
- le déplacement du vérin mobile
- le durée associée à cette force résistante et au déplacement

L'essai de traction dure entre 10 et 30 minutes.

4.5.2 Essai d'étanchéité

Une fois les éprouvettes réalisées, elles ont une forme cylindrique de 50 mm de hauteur et 50 mm de diamètre. Dans un seau rempli d'eau, on les fait tremper 36 heures afin d'obtenir des éprouvettes quasiment saturées en eau. Après cela, elles sont prêtes à être testées.

L'essai se déroule de la manière suivante, voir figure 4.20.

Dans une cellule confinée à l'air comprimé, on force de l'eau distillée à percoler au sein de l'échantillon grâce à une force de succion développée par une pompe à air. Le but étant de mesurer la durée que met un volume de 100 mL pour s'écouler dans l'échantillon. 3 à 4 mesures sont faites successivement pour plus de précision. Le confinement est contrôlé à un niveau constant de 140 kPa, ainsi que la force de succion qui est de -100 kPa (pression négative).

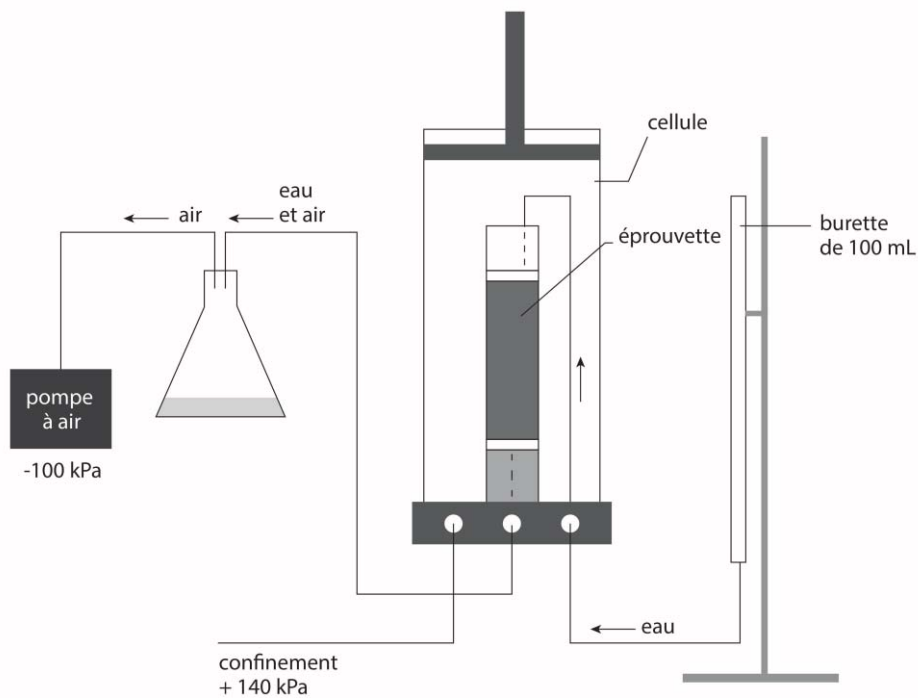


Figure 4.20 Schéma explicatif de l'essai de perméabilité

4.5.2.1 Procédure détaillée

1. Une membrane en latex est installée sur la face radiale de l'éprouvette pour forcer le déplacement de l'eau à se faire au cœur de celle-ci, voir figure 4.21. À noter que le confinement permet d'éviter que l'eau ne percole entre la membrane et l'éprouvette.



Figure 4.21 Mise en place de la membrane

Ce tube métallique permet l'installation de la membrane autour de l'éprouvette. La membrane est installée en première et on vient pomper les résidus d'air entre la membrane et le tube métallique. L'éprouvette est placée dans le tube métallique.

2. De la graisse est appliquée sur la base de la cellule pour sceller le dispositif et le rendre le plus hermétique possible, voir figure 4.22.
3. Une pierre poreuse fait la liaison entre la base et l'éprouvette. Le tout est scellé grâce à la membrane en latex, la graisse et une paire d'élastique, voir figure 4.22.
4. Une autre pierre poreuse vient faire la liaison entre la tête de la cellule et l'échantillon. Le tout est aussi scellé avec de la graisse et des élastiques, voir figure 4.23.
5. La cellule est fermée avec des écrous et rendue hermétique, voir figure 4.23.
6. La contre-pression est appliquée au sein de la cellule.
7. L'arrivée d'eau est ouverte.
8. La force de succion est appliquée.
9. Chaque fois qu'une burette se vide, la durée est notée. La burette est de nouveau remplie et le chronomètre remis à zéro pour une nouvelle acquisition manuelle. L'opération est renouvelée au moins 3 fois.



Figure 4.22 Premières précautions de mises en place du scellement à la base
La graisse est appliquée sur la base pour assurer le scellement de la membrane. Une pierre poreuse est placée sur la base pour faire la liaison avec l'éprouvette.

4.6 Cycles de Gel-Dégel

Le cycle de gel-dégel concerne la moitié des éprouvettes à tester. Ces éprouvettes ne possèdent pas de différence avec celles qui sont testées avant le cycle de gel-dégel. Elles sont issues des mêmes plaques d'enrobés réalisées en laboratoire.

Pour pouvoir faire subir ces cycles de gel-dégel à ces éprouvettes il faut leur coller un casque. Pour ce qui est des éprouvettes destinées aux essais d'arrachement, ce n'est pas un problème car cet essai nécessite la présence de ces casques. Cependant, pour les éprouvettes destinées à l'essai de perméabilité, la présence de casque nécessite d'avoir des éprouvettes plus longues que la longueur requise pour l'essai afin de pouvoir scier les éprouvettes à la bonne longueur une fois les cycles de gel-dégel terminés et par conséquent retirer les casques qui ne sont pas compatibles avec l'essai.

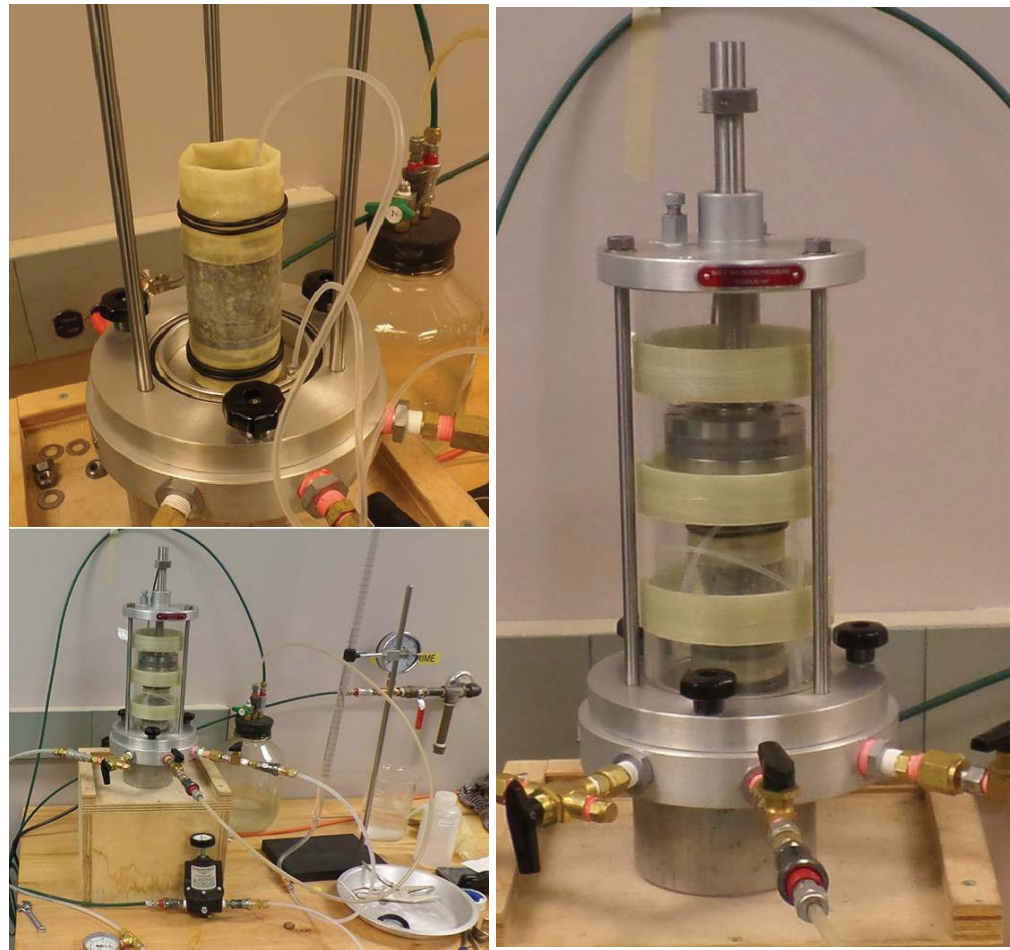


Figure 4.23 Fin de la mise en place de la cellule

Après avoir entièrement scellé le dispositif, on ferme la capsule hermétiquement pour permettre le confinement.

Il est bien évident que le but ici est de solliciter le joint en activant les phénomènes de compression-dilatation au sein de l'éprouvette dûs aux changements de température. Pour se faire, un montage métallique est vissé aux éprouvettes (par le biais des casques) qui empêche cette compression-dilatation de l'enrobé et qui vient appliquer une contrainte au sein de la réparation, voir figure 4.24.

Cependant, ce dispositif n'est pertinent uniquement si le joint est en position horizontale. En effet, lorsque le joint est en position verticale, le fait d'empêcher la contraction-dilatation thermique dans le même plan que la réparation ne va pas appliquer de contraintes dans ladite répa-



Figure 4.24 Les barres métalliques empêchent le retrait de l'éprouvette

ration. Pour pallier à ce problème, il a été décidé de scier en biais une des faces de l'éprouvette, voir figure 4.25, afin de créer un différentielle lors de la contraction thermique et par conséquent, induire un contrainte de cisaillement dans le joint, voir figure 4.27. On vient ensuite rectifier le parallélisme avec de la colle époxy.

Une fois les montages installés, on les place dans des bacs qui sont placés dans une enceinte thermique, voir figure 4.26. Ces bacs sont remplis de granulats grossiers. On choisit ces gros granulats par rapport au sable (voir 4.19) car au contact de ces granulats la conduction thermique est plus efficace. S'il y avait du sable, on aurait toute une partie de la surface qui serait imperméabilisée au froid et ainsi, on n'atteindrait pas la température voulue au sein de l'éprouvette.

La procédure du cycle peut enfin être lancée grâce au logiciel. Le cycle se caractérise de la manière suivante.



Figure 4.25 Mise en place du dispositif de CGD pour les éprouvettes avec joint vertical
Une face de l'éprouvette est sciée en biais. Ensuite, on vient poser de la colle époxy sur cette face pour corriger la parallélisme entre les deux surfaces aux extrémités.



Figure 4.26 Dispositifs finaux de montage pour le CGD

Les dispositifs sont mis en place dans les bacs. Ces bacs sont ensuite installés dans l'enceinte thermique.

La température baisse jusqu'à atteindre -10°C . Ensuite, la température est stabilisée à ce niveau pendant 6 heures, le temps que l'échantillon atteigne de façon homogène cette température. Passé ce délai, la température remonte à $+10^{\circ}\text{C}$. Cette température est aussi maintenue pendant 6 heures, pour les mêmes raisons. Enfin, la température revient à la température ambiante, voir figure 4.28. Cette procédure est répétée 3 fois pour les éprouvettes destinées aux essais

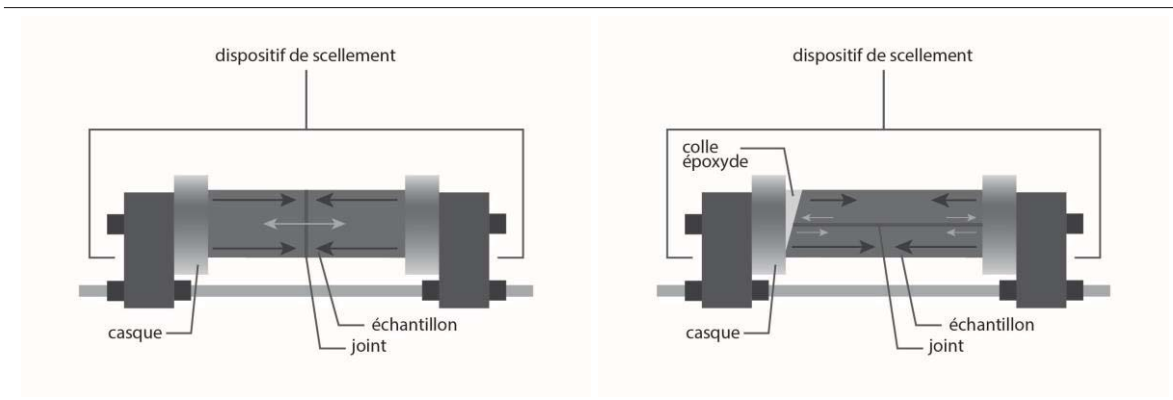


Figure 4.27 Schéma des dispositifs avec illustration des contraintes au sein de l'éprouvette pendant contraction thermique due à une faible température

À droite, l'éprouvette veut se contracter mais le dispositif empêche cette contraction, l'effort est repris au niveau du joint qui subit une traction. À gauche, la surface en biais crée un différentiel de retrait thermique, on crée donc dans le joint des efforts de cisaillement.

de traction et 2 fois pour les éprouvettes destinées aux essais de perméabilité. Les éprouvettes subissent donc deux ou trois CGD.

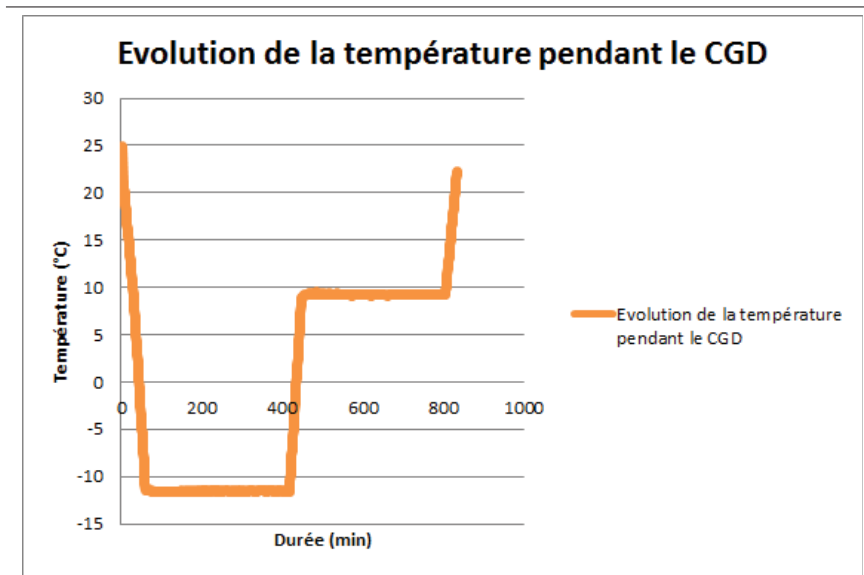


Figure 4.28 Graphique montrant l'évolution de la température au sein de l'enceinte

Le logiciel fait l'acquisition de la température au sein de l'enceinte toutes les secondes. Un cycle de gel-dégel dure environ 13 heures.

Lorsqu'un échantillon passe au CGD, on s'attend à ce que sa capacité de résistance à la traction diminue et que sa perméabilité augmente.

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Teneur en vides

La caractérisation de la teneur en vide d'une éprouvette est un aspect essentiel qui valide ou non la bonne réalisation de l'éprouvette. Afin de mesurer un telle grandeur, il a été mesuré, au préalable, la densité maximale du mélange (D_{mm}) et la densité brute de chacune des éprouvettes (D_{brut}).

On remarque que la recette de l'enrobé bitumineux confectionné prévoit une densité maximale équivalente à :

$$D_{mm} = 2,524 \quad (5.1)$$

Ainsi, la valeur réelle mesurée (voir section 4.3.1.3) diffère de 0,4 % de la valeur théorique.

Enfin, pour mesurer la teneur en vide, on effectue le calcul suivant :

$$\%_{vide} = 1 - \frac{D_{brut}}{D_{mm}} \quad (5.2)$$

On récapitule ces résultats dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 $\%_{vide}$ suivant les types d'éprouvettes

Essai	D_{brut}	D_{mm}	$\%_{vide}$
Arrachement	2,324	2,535	8,32
Perméabilité	2,335	2,535	7,89

Il faut noter qu'ici, les éprouvettes sont brutes, avant sciage et juste après carottage. De plus, la mesure de la teneur en vide s'est faite sur chacune des éprouvettes finales pour l'essai de perméabilité. Voici les tableaux récapitulatifs, tableau 5.2 et 5.3, pour chacun des types d'éprouvettes (joint horizontal ou vertical) :

Tableau 5.2 Moyennes des densités brutes et % de vides pour les éprouvettes testées avec un joint horizontal

Type d'échantillon		Désignation	D_{brut}	% vides	Moyenne D_{brut}	Moyenne % vides
Référence		1	2,387	5,8%	2,383 +/- 0,017	5,98% +/- 0,01
		2	2,365	6,7%		
		3	2,398	5,4%		
Liant d'accrochage	Avant CGD	$L_{2,1,1}$	2,309	8,9%	2,303 +/- 0,021	9,15% +/- 0,01
		$L_{2,1,2}$	2,323	8,3%		
		$L_{2,1,3}$	2,305	9,1%		
		$L_{2,1,4}$	2,274	10,3%		
	Après CGD	$L_{2,2,1}$	2,334	7,9%	2,321 +/- 0,021	8,46% +/- 0,01
		$L_{2,2,2}$	2,333	8,0%		
		$L_{2,2,3}$	2,325	8,3%		
		$L_{2,2,4}$	2,290	9,7%		
Bande bitumineuse	Avant CGD	$B_{2,1,1}$	2,391	5,7%	2,362 +/- 0,034	6,81% +/- 0,01
		$B_{2,1,2}$	2,389	5,8%		
		$B_{2,1,3}$	2,351	7,2%		
		$B_{2,1,4}$	2,318	8,5%		
	Après CGD	$B_{2,2,1}$	2,372	6,4%	2,344 +/- 0,026	7,53% +/- 0,01
		$B_{2,2,2}$	2,353	7,2%		
		$B_{2,2,3}$	2,343	7,6%		
		$B_{2,2,4}$	2,309	8,9%		

Tableau 5.3 Moyennes des densités brutes et % de vides pour les éprouvettes testées avec un joint vertical

Type d'échantillon		Désignation	D_{brut}	% _{vides}	Moyenne D_{brut}	Moyenne % _{vides}
Référence		1	2,387	5,8%	2,383 +/- 0,017	6,0% +/- 0,01
		2	2,365	6,7%		
		3	2,398	5,4%		
Liant d'accrochage	Avant CGD	$L_{2,1,1}$	2,355	7,1%	2,335 +/- 0,027	7,9% +/- 0,01
		$L_{2,1,2}$	2,350	7,3%		
		$L_{2,1,3}$	2,339	7,7%		
		$L_{2,1,4}$	2,296	9,4%		
	Après CGD	$L_{2,2,1}$	2,294	9,5%	2,329 +/- 0,029	8,1% +/- 0,01
		$L_{2,2,2}$	2,365	6,7%		
		$L_{2,2,3}$	2,328	8,2%		
		$L_{2,2,4}$	2,329	8,1%		
Bande bitumineuse	Avant CGD	$B_{2,1,1}$	2,357	7,0%	2,395 +/- 0,025	5,5% +/- 0,01
		$B_{2,1,2}$	2,405	5,1%		
		$B_{2,1,3}$	2,407	5,0%		
		$B_{2,1,4}$	2,410	4,9%		
	Après CGD	$B_{2,2,1}$	2,401	5,3%	2,385 +/- 0,022	5,9% +/- 0,01
		$B_{2,2,2}$	2,396	5,5%		
		$B_{2,2,3}$	2,392	5,6%		
		$B_{2,2,4}$	2,353	7,2%		

On remarque qu'aux moyennes calculées pour la densité brute et le pourcentage de vides, on a ajouté l'incertitude représentée par l'écart-type.

5.2 Essais d'arrachement

Pour les essais d'arrachement, les calculs des densités brutes pour chacune des éprouvettes n'ont pas paru pertinents.

Les essais d'arrachement ont été effectués sur 15 éprouvettes séparées en plusieurs catégories (comme précédemment) :

- 1 échantillon de référence
- 3 échantillons avec le liant, avant CGD
- 4 échantillons avec le liant, après CGD
- 4 échantillons avec la bande, avant CGD
- 3 échantillons avec la bande, après CGD

L'acquisition des données se fait, assistée par ordinateur, tous les dixièmes de seconde. L'ordinateur enregistre le déplacement du piston mobile, la force nécessaire à ce déplacement et la durée.

Ainsi, pour chacune des 15 éprouvettes, il y a un graphique représentant deux courbes. Une courbe pour le contrôle du déplacement en fonction du temps et l'autre courbe pour exprimer la force nécessaire au piston en fonction du temps.

Le graphique ainsi généré, voir figure 5.1, nous informe si le déplacement du piston est constant et cohérent avec la vitesse imposée (0,1 mm/min). De plus, la courbe représentant la force résistante en fonction du temps identifie une force maximale de résistance et la durée pour laquelle on atteint cette force.

On remarque que le comportement lors de la traction, au niveau de la force de résistance, comporte plusieurs phases. Tout d'abord, une phase ascendante, relativement rapide, jusqu'à atteindre un plateau sous forme de maximum. Ensuite, une phase descendante, relativement aussi rapide. Enfin, une phase où l'échantillon se déforme sans opposer beaucoup de résistance.

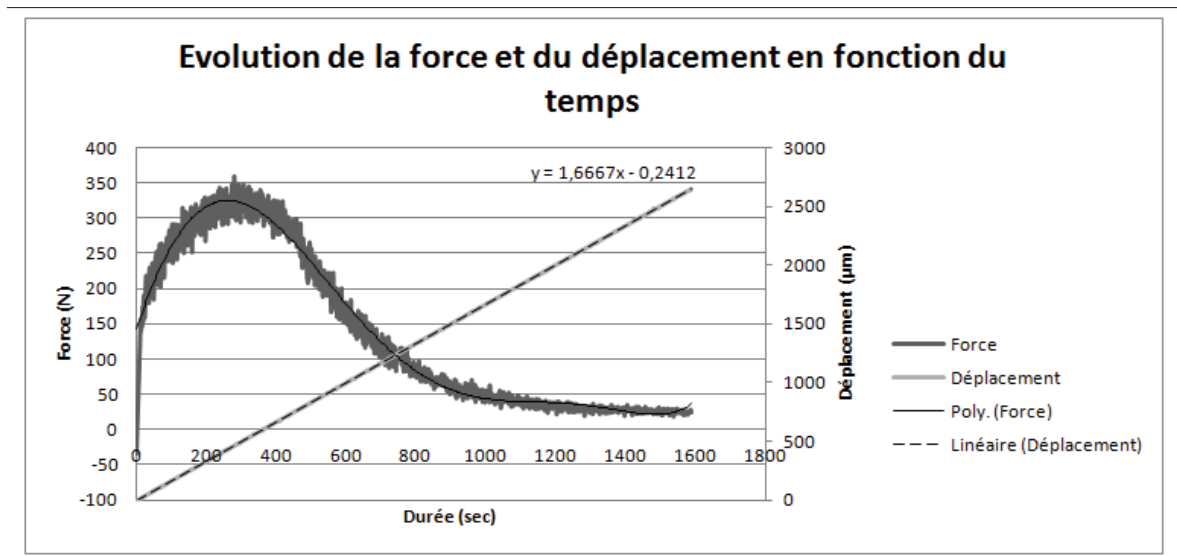


Figure 5.1 Graphique représentant les caractéristiques à l'essai de traction d'une éprouvette réparée au liant d'accrochage, après CGD

Il faut noter que la courbe qui représente la force possède un *bruit* non négligeable. Par conséquent, il a été décidé de produire une courbe de tendance polynomiale d'ordre 6 (afin d'être le plus précis possible). Le logiciel Excel permet de réaliser cette courbe. De plus, on peut déterminer les coefficients de l'équation de la courbe d'ordre 6. Ainsi, on peut déterminer le maximum de la courbe en question. Ce sont ces maxima que l'on compare entre eux.

Une courbe de tendance linéaire est aussi réalisée pour la courbe de déplacement pour engendrer un coefficient directeur et ainsi contrôler que la vitesse de déplacement est bien conforme aux exigences.

Il y a donc 15 graphiques qui sont générés et qui fournissent les informations nécessaires, se référer à l'annexe I. Nous avons compilé les informations dans un histogramme, voir figure 5.2.

En premier lieu, il est important de noter que la force résistante diminue pour toutes les éprouvettes où il y a une réparation par rapport à l'éprouvette de référence (qui par définition n'a pas subi de réparation). Ensuite, on peut voir un comportement différent des éprouvettes ayant subi un CGD. En effet dans les cas des éprouvettes réparées au liant d'accrochage la résistance

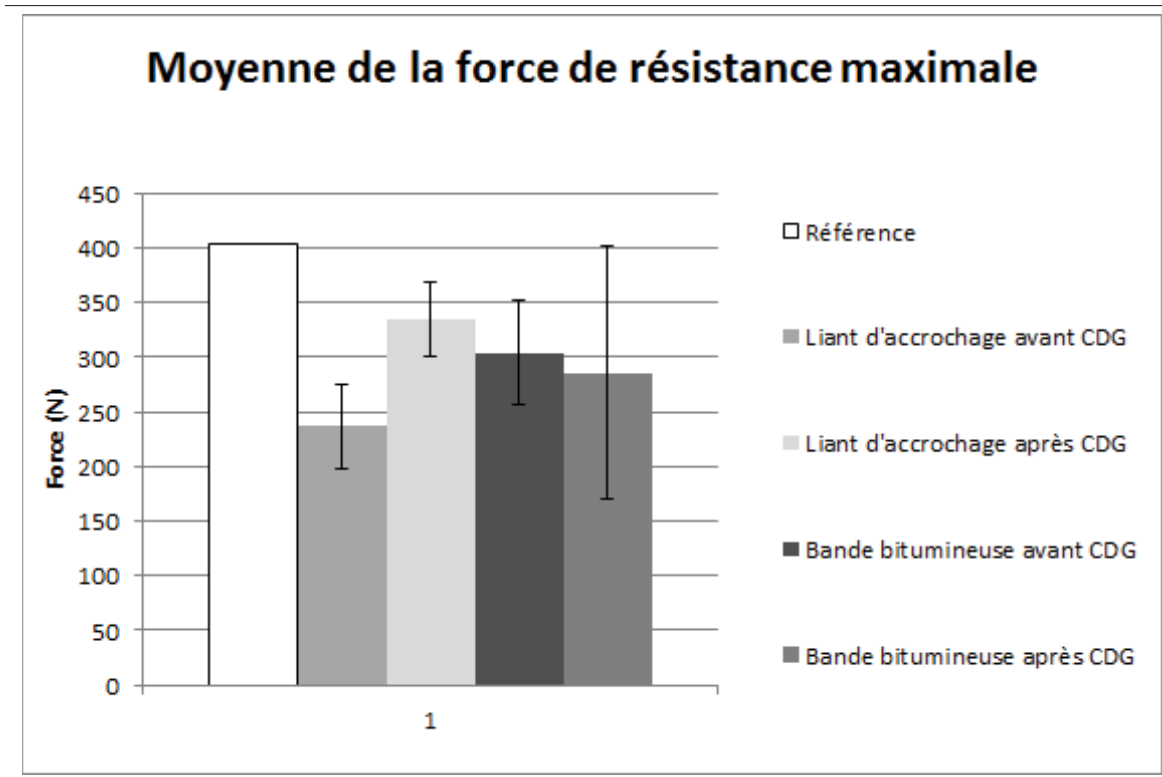


Figure 5.2 Histogramme récapitulatif des moyennes de force résistante à l'essai de traction suivant les différents types d'éprouvettes avant traitement des données

augmente après CGD alors que l'inverse se passe pour les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse. Enfin, de manière globale, il n'y a pas de réelle différence entre la résistance des éprouvettes réparées au liant (en moyenne : 286,1 N) et celles réparées à la bande (en moyenne : 295,1 N).

Un autre paramètre à considérer ici, pour cet essai, est le fait que la fracture au sein de l'échantillon ne se fait pas au même endroit dépendamment du type d'échantillon. En effet, pour les éprouvettes réparées au liant, la fracture se fait toujours au niveau du joint. Tandis que pour les éprouvettes réparées à la bande, la fracture se fait toujours dans l'enrobé, sur l'une ou l'autre extrémité de l'éprouvette. De même pour l'échantillon de référence qui brise aux extrémités aussi.

Enfin, il est donc nécessaire de préciser que ces données sont à relativiser et qu'il ne faut pas en tirer trop rapidement de conclusions. En effet, les barres d'erreurs qui représentent l'écart-type de chacune des moyennes calculées montrent qu'il y a des différences importantes entre les données issues d'un même type d'éprouvette. Une analyse des résultats est donc indispensable.

5.3 Essais de perméabilité

Après avoir mesuré le pourcentage de vides au sein de chacune des éprouvettes, nous avons procédé à l'essai à proprement parlé. Ainsi, comme expliqué précédemment, nous avons mesuré le temps que met une éprouvette de 100 mL à s'écouler au sein de l'éprouvette. Les éprouvettes ont toutes des dimensions similaires, à savoir, un cylindre de 50 mm de hauteur et 50 mm de diamètre.

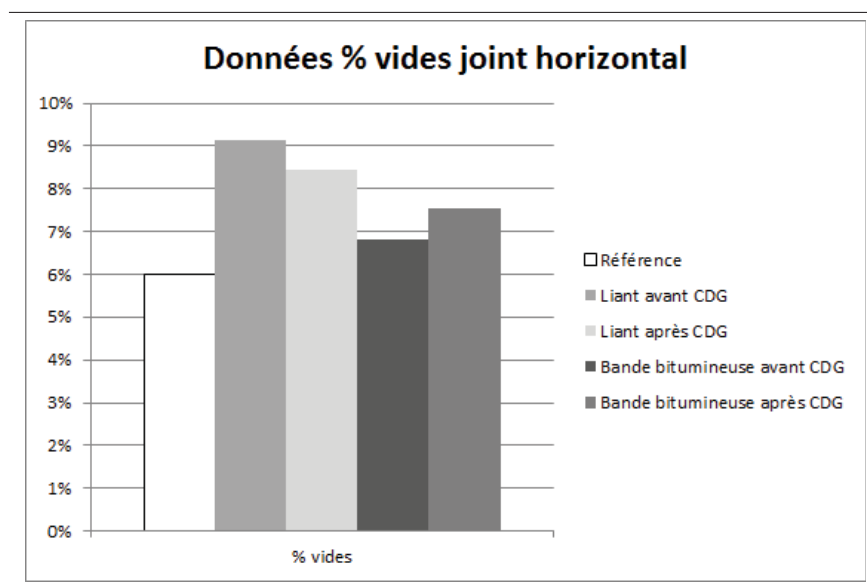


Figure 5.3 Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec un joint horizontal

On remarque que, voir figure 5.3 et 5.4, on augmente le pourcentage de vides lorsque l'on répare avec le liant d'accrochage que ce soit pour des éprouvettes avec un joint vertical ou horizontal. Cependant, concernant les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse cette augmen-

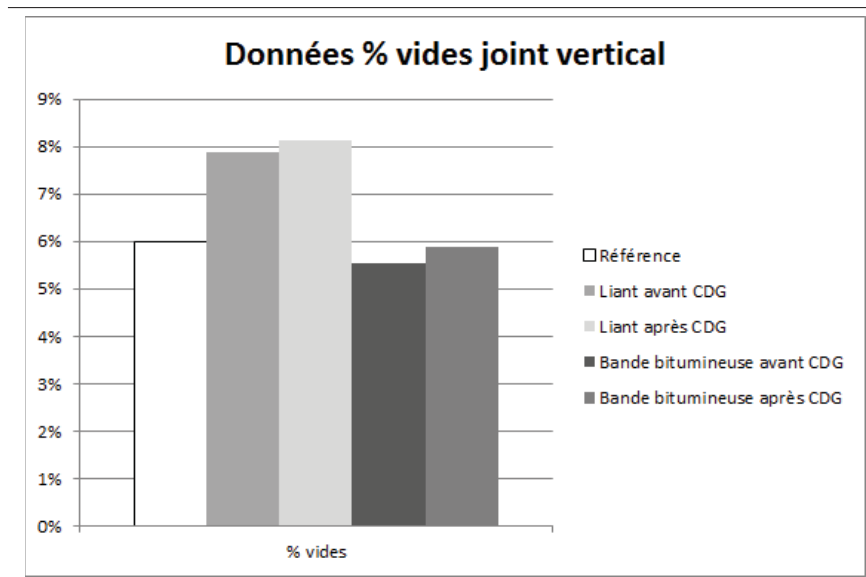


Figure 5.4 Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec un joint vertical

tation est bien moins évidente. De plus, dans 1 cas sur 4 on vient à diminuer les pourcentages des vides après CGD. En effet, pour les éprouvettes réparées au liant avec un joint horizontal, on passe de 9,1 à 8,3 % de vides.

Nous n'avons pas retranscrit les barres d'erreurs ici car cela ne nous a pas paru pertinent. En effet, à chaque fois, l'écart-type est de 0,01% d'après les tableaux 5.2 et 5.3.

Les essais se déroulent toujours suivant la même procédure (détaillée précédemment) et ce, répétés 3 à 4 fois afin d'avoir des données précises et pertinentes.

Lors de ces essais, une chose particulière a été remarquée : tous les échantillons réparés à la bande n'ont laissé aucun volume d'eau s'écouler en son sein. Que ce soit pour des éprouvettes avec le joint horizontal ou vertical. Tous ces échantillons sont donc imperméables à ces pressions de sollicitations. Il a été considéré qu'au-delà de 30 min sans aucun écoulement à une pression de succion de -100 kPa, l'échantillon était imperméable. C'est pourquoi dans les tableaux et graphiques concernant l'essai de perméabilité, voir figures 5.5 et 5.6, les éprouvettes réparées à la bande n'apparaissent pas.

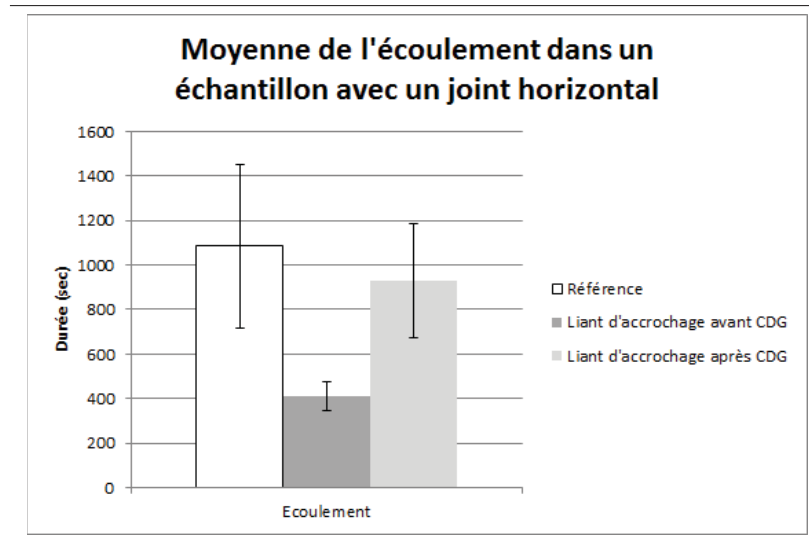


Figure 5.5 Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint horizontal

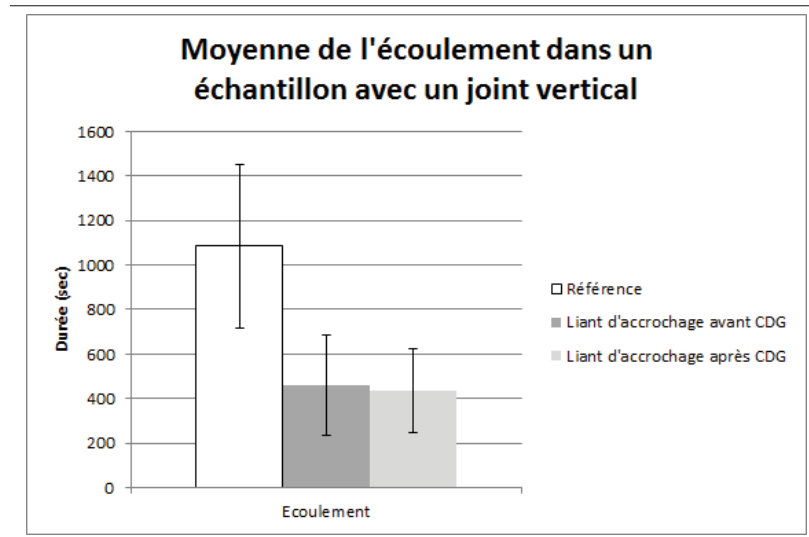


Figure 5.6 Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint vertical

Les essais de perméabilité nous montrent que les éprouvettes avant CGD réduisent significativement la durée de l'écoulement de l'eau, que ce soit pour les éprouvettes avec un joint vertical ou horizontal.

On remarque aussi que concernant les comportements des éprouvettes après CGD, il y a une différence notable entre les éprouvettes avec des joints verticaux et horizontaux. En effet, avec le joint vertical, l'écoulement est sensiblement le même après qu'avant CGD. Tandis que pour les éprouvettes avec le joint horizontal, l'écoulement augmente de manière significative. En effet, la durée d'écoulement est doublée pour les échantillons ayant subi les CGD.

Enfin, comme avec l'essai d'arrachement, on remarque que les barres d'erreurs (issues du calcul des écarts-types) sont importantes en proportion. Il est donc, là aussi, nécessaire de faire une analyse précise des résultats pour avoir plus de cohérence. Les données brutes récoltées ont donc besoin d'être traitées.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Teneur en vides

On obtient une D_{mm} de 2,535 qui est très proche de la valeur théorique. On peut donc valider la procédure de fabrication des plaques d'enrobé dans un premier temps. De plus pour ce qui est des échantillons destinés aux essais de perméabilité, on remarque que leurs teneurs en vides sont voisines de 6%, ce qui est réglementaire.

Cependant, les données récoltées montrent une certaine différence entre les échantillons au niveau du pourcentage de vides. En effet, on observe une différence au niveau des éprouvettes destinées aux essais de traction et celles destinées aux essais de perméabilité. De même, pour les éprouvettes destinées aux essais de perméabilités entre elles.

Ces différences notables sont à mettre au crédit de l'hétérogénéité de la répartition des vides au sein de la plaque d'enrobé réalisée en laboratoire. Lors du compactage, on vient créer une distribution des vides qui est fonction de l'éloignement des parois de la plaque. Ainsi, plus on se retrouve au cœur de la plaque, moins il y a de vides. Donc, lorsque les directions de carottage sont différentes (se rapporter à la figure 4.14), on vient créer une différence de pourcentage de vides.

Dans la même idée, pour les éprouvettes destinées aux essais de perméabilité, la différence se base sur le fait que les carottes ont chacune une position unique sur la plaque d'enrobé. On peut aussi y ajouter le fait que d'une plaque à l'autre, la réalisation n'est pas toujours totalement identique. Enfin, on peut aussi émettre des réserves quant à l'efficacité du CGD dans son entreprise d'usure du joint. Ainsi, après avoir retiré les données après CGD, on obtient les histogrammes suivants, voir figure 6.1 et 6.2.

En prenant comme étalon l'échantillon de référence, on constate que les vides augmentent avec la réparation au liant et qu'ils sont sensiblement semblables avec la réparation à la bande.

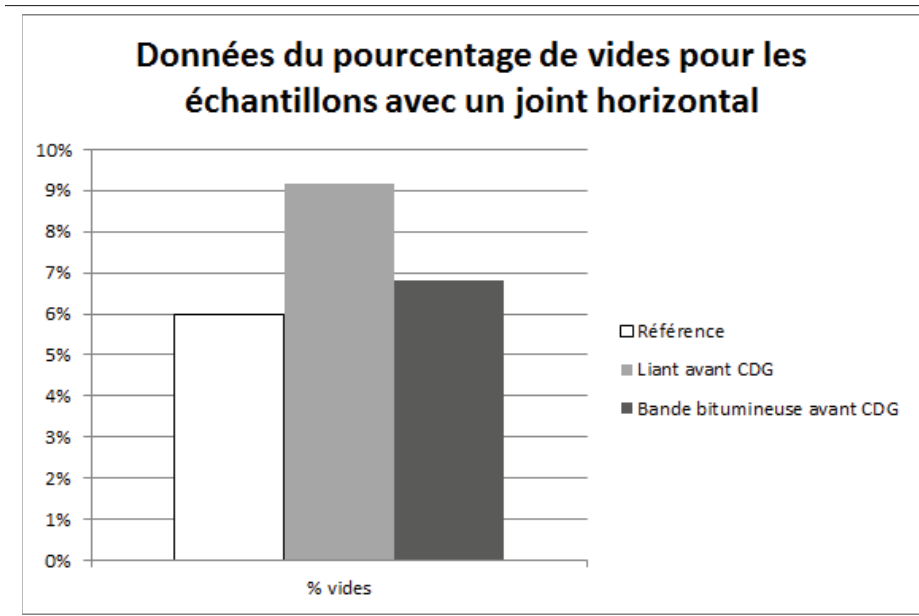


Figure 6.1 Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec joint horizontal après traitement des données

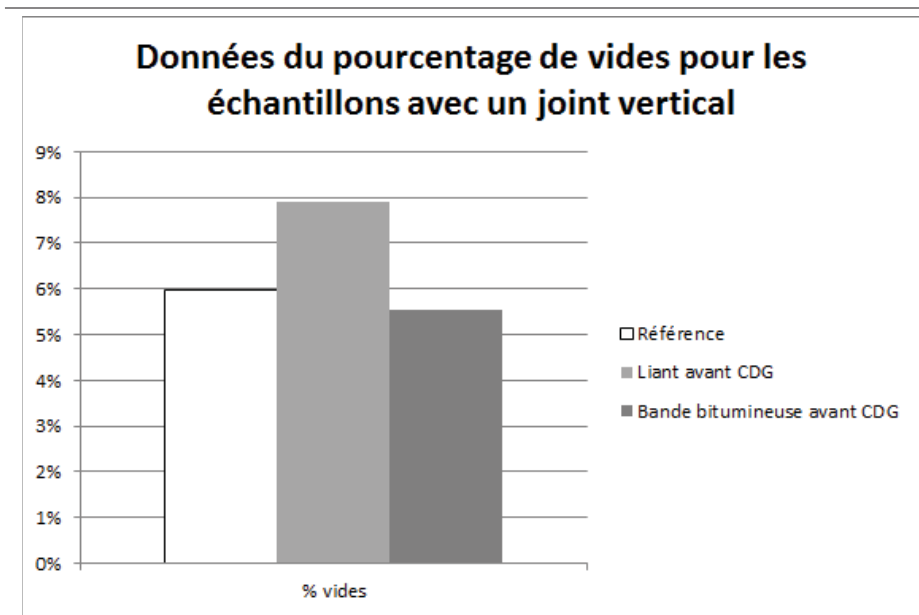


Figure 6.2 Histogramme récapitulatif des pourcentages de vides des éprouvettes avec joint vertical après traitement des données

6.2 Essais d'arrachement

Avant toute chose, il est important de dire que certains essais n'ont pas fonctionné du tout comme on le voulait. C'est le plus souvent dû à de mauvaises manipulations de la part de l'opérateur. Par exemple, on peut voir en annexe pour les graphiques I-2, I-9 et I-10 que la vitesse de traction du vérin n'est pas celle désirée. Ces données ne sont donc pas prises en compte pour le comparatif final.

6.2.1 Zone de fracture

Comme énoncé plus haut, les zones de fractures diffèrent suivant s'il s'agit d'une éprouvette réparée au liant ou à la bande. On vient expliquer cela en mettant en cause cette hétérogénéité de la répartition des vides au sein de la plaque d'enrobé. En effet, le fait qu'il y ait plus de vides aux abords des parois implique que les carottes possèdent plus de vides sur leurs extrémités hautes et basses.

Lorsque les éprouvettes sont réparées au liant d'accrochage, la fracture a quand même lieu au niveau de la réparation. Ainsi, on vient appliquer une contrainte qui vient directement solliciter la réparation, jusqu'à la fracture (apparition de fissures). On identifie un plan de faiblesse.

Cependant, lorsque la réparation est à base de bande bitumineuse, la fracture se fait à chaque fois sur une des extrémités (en haut ou en bas de l'éprouvette). Il semble donc que ces zones soient moins résistantes que la réparation à la bande elle-même. Afin de valider cela, nous avons essayé de réduire significativement la hauteur d'une éprouvette. Nous avons donc raboté aux deux extrémités de l'échantillon pour n'avoir que le cœur de la plaque d'enrobé et ainsi réduire le pourcentage de vide. De 8 cm on passe à un 4 cm, voir figure 6.3. On force donc la rupture à se produire dans la réparation.

On voit que la fracture se fait quand même sur une extrémité. Mais on remarque aussi que l'on vient solliciter de manière non négligeable la bande (voir photo de droite sur la figure 6.3). En



Figure 6.3 Éprouvette après l'essai d'arrachement

La photo de droite est zoom au niveau de la surface radiale de l'éprouvette. La flèche pointe l'endroit où l'on vient étirer la bande.

effet, le profil de la bande est étiré. C'est la seule fois lors des essais que la bande est sollicitée à ce point.

On décide donc de ne prendre que la donnée de cette éprouvette pour faire la comparaison avec les éprouvettes réparées au liant d'accrochage car ce ne serait pas pertinent de comparer des éprouvettes dont la réparation n'a pas été vraiment sollicitée en ce qui concerne la résistance à l'arrachement, voir figure 6.4. À noter que cette éprouvette n'a pas subi de CGD.

6.2.2 Cycles de Gel-Dégel

On observe un comportement aléatoire concernant les éprouvettes ayant subi des CGD. En effet, dans certains cas la résistance augmente et dans d'autres elle diminue. Si l'on décide d'éliminer les données d'après CGD sur les éprouvettes réparées à la bande, on a même une augmentation de la résistance de traction après CGD pour les éprouvettes réparées au liant. On émet un doute quant à la bonne procédure de l'essai de CGD. Que ce soit concernant les tem-

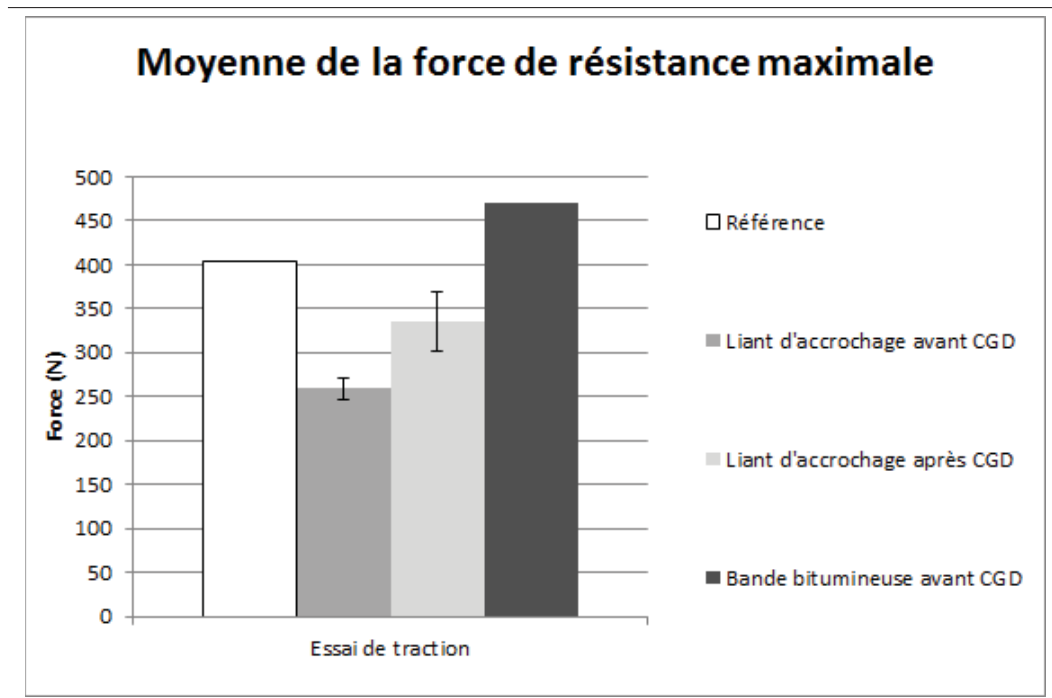


Figure 6.4 Histogramme des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données sur les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse

pératures du cycle ou le dispositif de scellement de l'éprouvette qui empêche la compression-dilatation, la procédure doit être modifiée.

Ainsi, si l'on considère que les données après CGD ne sont pas pertinentes, on obtient le graphique suivant, voir figure 6.5.

Après le traitement final des données, on observe une nette différence de résistance entre les trois types d'éprouvettes. En effet, les éprouvettes réparées au liant perdent une nette résistance à la traction en comparaison avec l'échantillon de référence. Tandis que l'éprouvette réparée à la bande est non seulement plus résistante que celles réparées au liant mais aussi, et c'est important, plus résistante que l'échantillon de référence. Ce phénomène s'explique car la seule donnée pour la bande vient de l'échantillon raccourci à ses extrémités. Ainsi, l'échantillon est moins sujet au phénomène d'effet de paroi (voir 4.6) et il possède moins de vides. Cette diminution des vides peut expliquer pourquoi la force de résistance maximale pour cette éprouvette est plus importante que pour celle de l'échantillon de référence.

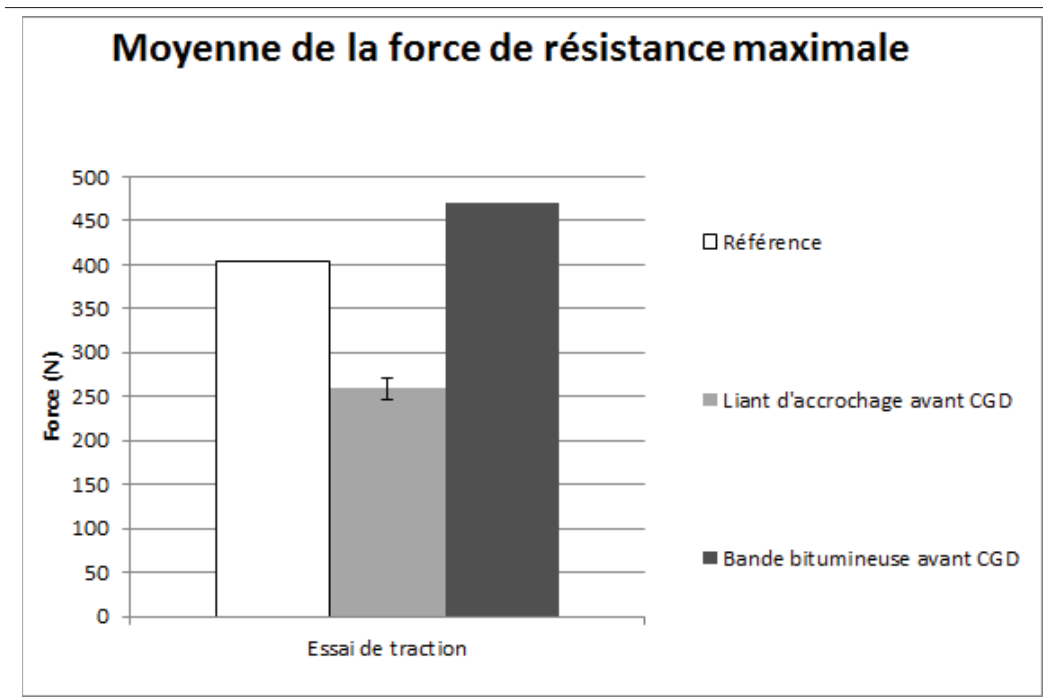


Figure 6.5 Histogramme récapitulatif des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données final

De plus, les essais n'ont pas pu déterminer la valeur réelle de résistance à l'essai de la bande bitumineuse à la traction. On peut donc faire l'hypothèse que la résistance est encore plus grande que celle identifiée.

6.3 Essais de perméabilité

6.3.1 Imperméabilité des éprouvettes réparées à la bande bitumineuse

Lors de l'essai de perméabilité, les éprouvettes de références ont donné une durée d'écoulement de l'ordre de 1000 secondes. Ainsi, lorsque l'on a voulu tester les éprouvettes ayant subi une réparation, nous ne nous attendions pas à observer une imperméabilité totale des éprouvettes réparées à la bande bitumineuse, et ce, pour les deux directions (horizontale et verticale).

En ce qui concerne les éprouvettes possédant un joint horizontal, il était prévisible que ce phénomène arrive. En effet, lorsque le joint en bande bitumineuse est présent, on vient créer

une barrière en matériau bitumineux compact. De plus, ce joint horizontal se trouve dans la direction perpendiculaire au sens de l'écoulement de l'eau lors de l'essai. Le joint crée donc une barrière infranchissable et comme le dispositif expérimental force l'écoulement de l'eau à se faire en son sein, il n'y a pas d'écoulement et l'éprouvette est imperméable.

Ce n'est donc pas pour ce type d'éprouvettes que le phénomène est remarquable. Pour les éprouvettes avec le joint vertical, on observe donc aussi une imperméabilité. Plusieurs hypothèses sont suggérées ici.

Tout d'abord, la bande lors de sa mise en place (compactage à chaud), vient se ramollir et combler les éventuels vides sur une certaine zone d'influence. Cependant, cette zone ne peut pas s'étendre à la partie de l'enrobé existant puisqu'il a été, par définition, fabriqué avant le nouvel enrobé. On devrait donc avoir une section d'écoulement réduite de moitié (équivalent à la section de l'enrobé existant) mais non sur la totalité de la section de l'éprouvette. Ensuite, les opérations de carottage et de sciage viennent abîmer la bande. En effet, la bande est un matériau mou et les outils de carottage et de sciage sont destinés à des matériaux durs comme l'enrobé bitumineux. Ainsi lorsque la lame arrive au niveau de la bande, elle vient la lacérer de manière désordonnée, des morceaux se détachent et le mouvement de la lame amène ces résidus de bande sur la surface de l'éprouvette. On suppose donc que ces opérations de carottages et de sciage viennent boucher les pores en surface et ainsi sceller encore plus l'éprouvette. Enfin, peut-être faudrait-il appliquer une force de succion plus importante que -100 kPa. En effet, sous de plus fortes pressions, il est possible que l'on observe un écoulement. Le caractère imperméable n'est pas définitif ici mais simplement, aux limites des caractéristiques de notre essai, elle semble l'être.

Par conséquent, tous les graphiques comparatifs ne mentionneront pas les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse.

6.3.2 Cycles de Gel-Dégel

De même que pour les essais de traction, on observe des anomalies dans le comportement des éprouvettes après CGD. En effet, alors qu'elles sont censées avoir subi une usure due aux cycles, les éprouvettes après CGD (notamment celles avec le joint horizontal) donnent des résultats contradictoires. On vient, augmenter la durée de l'écoulement de l'eau et donc favoriser l'imperméabilité. Pour les éprouvettes avec le joint vertical, on observe une diminution de cette durée d'écoulement mais elle reste minime en comparaison avec les écoulements des éprouvettes avant CGD.

Deux phénomènes sont susceptibles d'être des facteurs d'erreurs. Tout d'abord, il y a le cycle en lui-même. Les températures de -10 °C à $+10\text{ °C}$ ne sont peut-être pas adaptées pour faire subir à l'éprouvette une usure quelconque. Ensuite, le dispositif de scellement de l'éprouvette est peut-être inefficace. Lors de la mise en place du dispositif, on vient serrer les deux plaques d'acier contre les deux casques. Cette action peut engendrer une contrainte de compression qui tend à renforcer l'éprouvette.

Encore une fois ici, on met en doute la pertinence de l'essai de qui ne donne pas satisfaction aux vues des résultats énoncés. Ainsi, après traitement des données, on obtient les histogrammes suivants, voir figures 6.6 et 6.7.

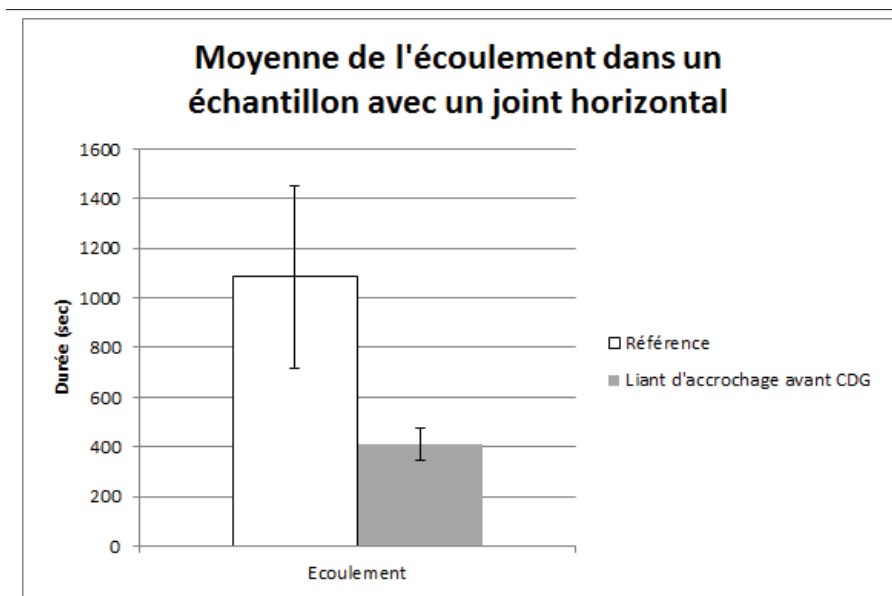


Figure 6.6 Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint horizontal après traitement des données final

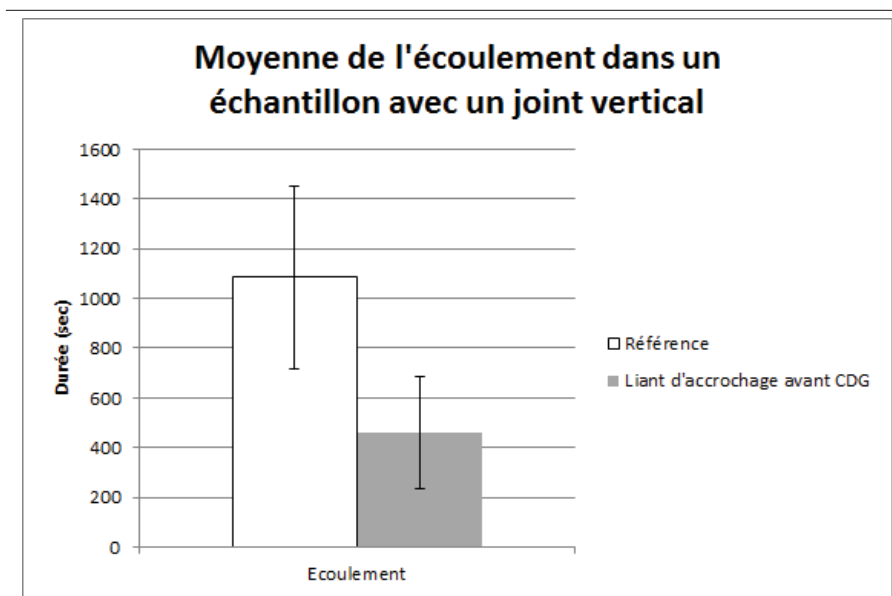


Figure 6.7 Histogramme récapitulatif de l'écoulement pour les échantillons avec un joint vertical après traitement des données final

Enfin, si l'on compare ces deux derniers diagrammes, on voit bien que l'écoulement dure moins longtemps avec les éprouvettes réparées, peu importe le sens du joint. Ainsi, on augmente la perméabilité de l'éprouvette lorsqu'elle subit une réparation au liant. C'est ce à quoi on s'attendait ici. On peut faire la corrélation avec les diagrammes de pourcentage de vides où l'on voit nettement que ce pourcentage augmente par rapport à l'échantillon de référence pour les éprouvettes réparées au liant d'accrochage.

On n'observe pas de différence notable entre les éprouvettes avec le joint horizontal de celles avec le joint vertical au niveau des données d'écoulement. Cependant, il est intéressant de remarquer que l'incertitude représentée par les barres d'erreurs est plus importante pour les éprouvettes avec un joint vertical que celles avec un joint horizontal.

Enfin, on peut aisément affirmer qu'au niveau de la perméabilité, la bande bitumineuse possède des caractéristiques plus intéressantes que le liant d'accrochage.

6.4 Récapitulatif

Les figures 6.8 et 6.9 récapitulent les données analysées du projet.

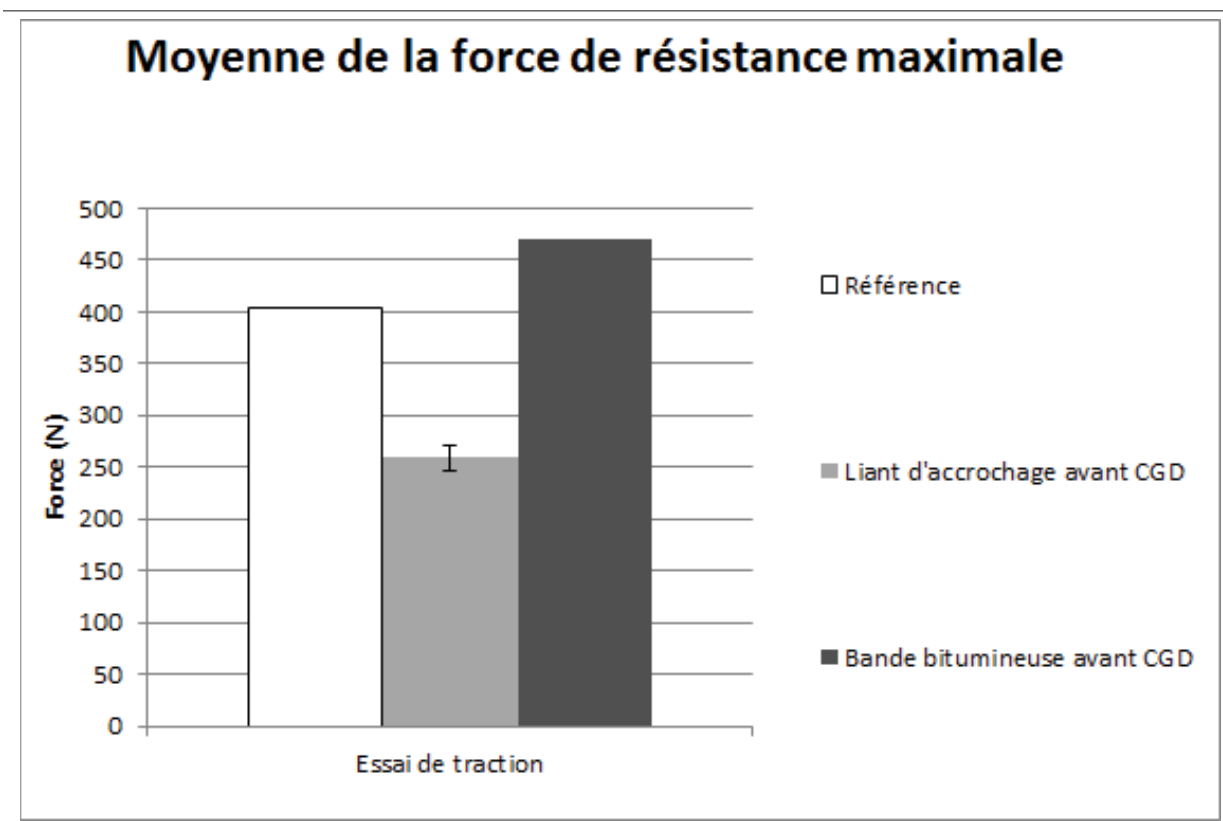


Figure 6.8 Histogramme récapitulatif des moyennes de forces de résistance maximale après traitement des données final

La force de résistance est significativement plus importante pour la bande bitumineuse qu'avec le liant d'accrochage.

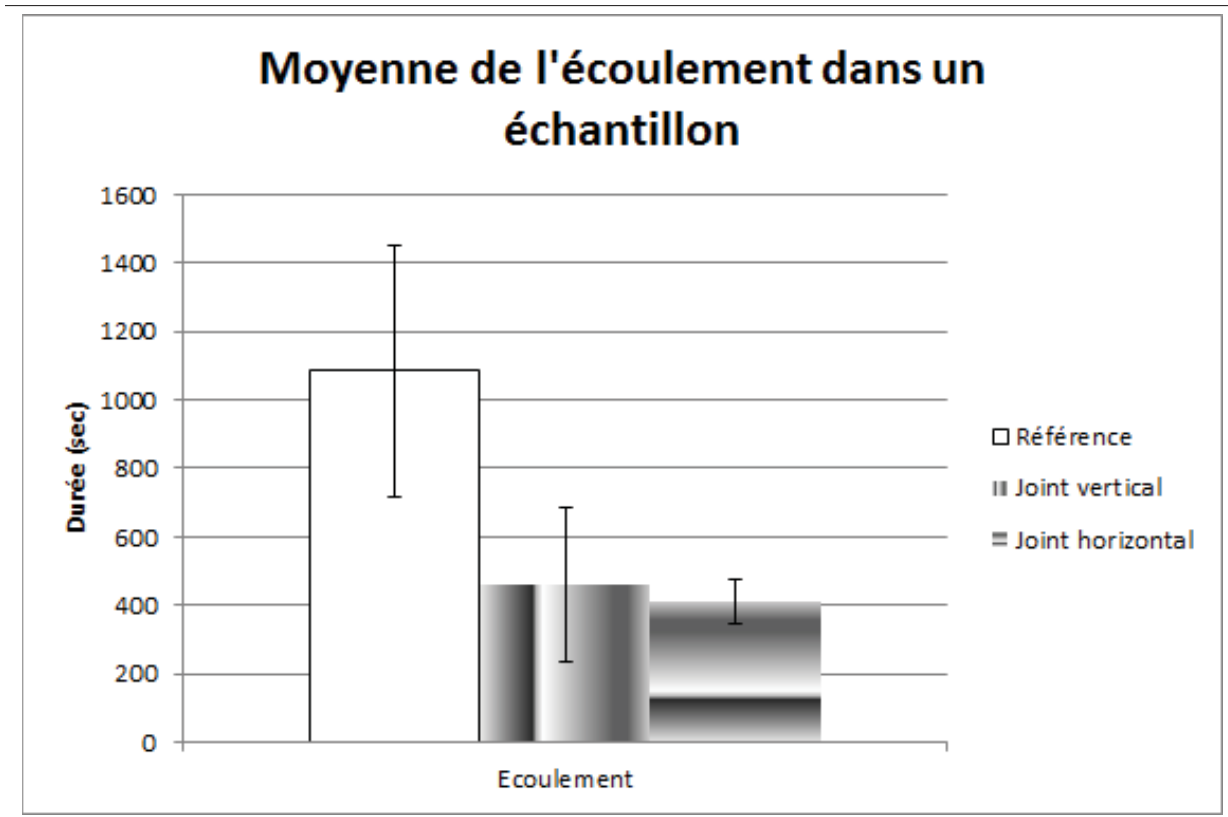


Figure 6.9 Histogramme récapitulatif des écoulements pour les éprouvettes réparées au liant d'accrochage après traitement des données final

En rappelant que les éprouvettes réparées à la bande bitumineuse sont *imperméables* suivant le protocole expérimental.

CONCLUSION

Nous avons pu, avec tous les essais effectués, déterminer, hiérarchiser et donc comparer les deux matériaux en jeu ici. Notre approche est pragmatique avant tout. Cependant, ce projet de recherche n'a pas la prétention de donner des éléments qui ont une portée scientifique dans le sens où tous les essais ne sont pas standardisés et ne sont régis par aucune norme. Ainsi, les valeurs de force de résistance maximale ou de durée d'écoulement ne sont pas à comparer avec d'autres données issues d'autres projets de recherche. Le but étant ici de faire une étude *comparative* entre deux matériaux. La démarche a donc été la comparaison de ces matériaux suivant une *procédure expérimentale identique* pour tous les échantillons pour chacun des deux essais. La fabrication des plaques d'enrobés a cependant, elle, été réalisée de manière standard suivant la norme LC 26-400 : "Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC". De même concernant l'application du liant d'accrochage comme matériau de réparation où on utilise la norme LC 25-011 : "Préparation d'éprouvettes de laboratoire afin d'évaluer la force de liaison d'une émulsion d'accrochage", afin de respecter la procédure de mise en place.

Les deux essais se basent donc sur des valeurs références réalisées sur des éprouvettes d'enrobé bitumineux, vierge de toute réparation. Ces valeurs servent d'étalon.

Un phénomène qui a dû être pris en compte est l'hétérogénéité de la distribution des vides au sein de la plaque d'enrobé. Cette hétérogénéité est responsable de la variation des valeurs des teneurs en vides pour les échantillons d'un même type pour les éprouvettes destinées à l'essai de perméabilité. Mais aussi, ce phénomène est responsable de l'apparition des zones de fractures aux extrémités des éprouvettes réparées à la bande bitumineuse. En effet, le phénomène d'effet de paroi implique que la concentration en vides est plus importante lorsque l'on se rapproche d'une surface de la plaque d'enrobé.

Il y a encore deux choses que l'on n'a pas pu expliquer et démontrer ici. Tout d'abord, il s'agit de l'anomalie concernant l'imperméabilité des éprouvettes réparées à la bande bitumineuse avec un joint vertical. Nous supposons que les manipulations mécaniques sur les éprouvettes comme le sciage et la carottage ont pu altérer les surfaces mises en jeu dans l'essai de per-

méabilité (surfaces aux extrémités). La bande a sûrement aussi joué un rôle en comblant les pores lors du compactage du nouvel enrobé. Mais aucune de ces deux hypothèses n'explique l'imperméabilité totale de ces éprouvettes. Enfin, les limites matérielles pour la réalisation de l'essai sont aussi une explication car il n'était pas techniquement possible d'appliquer une contrainte de succion plus importante au sein de la cellule. De plus grandes pressions auraient peut-être permis d'identifier des valeurs de durée d'écoulement. Ensuite, il y a les comportements contradictoires des éprouvettes ayant subies un CGD. Dans certains cas, la résistance à la traction et l'imperméabilité ont été, de manière significative, améliorées et lorsqu'elles ce n'était pas le cas, la différence n'était pas assez évidente pour en tirer de réelles conclusions. Ici, nous supposons que le protocole expérimental de l'essai de CGD est défaillant. Il peut s'agir d'une mauvaise mise en place du dispositif de scellement de l'éprouvette ou encore de la procédure thermique du cycle qui n'est pas pleinement efficace (pas de compression-dilatation notable à ces températures).

Enfin, si l'on compare les données finales (après traitements) concernant les essais de traction et de perméabilité, on observe une nette supériorité du matériau Denso en comparaison à l'émulsion de bitume.

Non seulement on observe une imperméabilité expérimentale ici mais en plus la résistance en traction est bien supérieure pour la bande bitumineuse. Sachant que l'essai de traction n'a pas pu aller jusqu'à la résistance maximale de la bande qui était trop importante pour l'enrobé (qui cède toujours en premier).

RECOMMANDATIONS

Ainsi, d'un point de vue uniquement performance, nous recommandons vivement d'intégrer la bande bitumineuse Denso dans les processus de réparation de chaussée au détriment de l'émulsion de bitume. La résistance à la traction et la perméabilité étant bien meilleures pour la bande bitumineuse, elles font de ce matériau une alternative crédible à l'émulsion de bitume.

Afin d'être complet, une analyse économique devrait être réalisée en parallèle d'une analyse de faisabilité in situ. Ainsi, les aspects économiques et de réalisation seraient pris en compte, notamment car la procédure de mise en place diffère d'un matériau à l'autre. Idéalement, une observation en chantier sur la mise en place du joint devrait être faite ainsi qu'un échantillonnage. On aurait donc une idée pratique des différences de mise en place des deux matériaux et du temps de mobilisation d'une équipe pour réaliser une même surface de réparation. En comparant cela et les prix de revient auprès des distributeurs, il serait donc possible de comparer les coûts en parallèle, et donc d'émettre une recommandation finale, complète, prenant en compte tous les aspects importants pour les professionnels.

Enfin, d'un point de vue du protocole expérimental, certaines choses pourraient être améliorées. Les essais de CGD doivent être modifiés afin d'avoir une idée sur la durabilité de chaque matériau. Il faudrait ainsi mettre en place un système de scellement qui n'applique pas de contrainte de compression lors de sa mise en place. De plus, les températures lors du cycle devraient certainement être plus importantes en valeur absolue. La température au sein de l'éprouvette devrait être enregistrée en plus de celle de l'enceinte thermique. Le bitume ayant un PG 58-28, on pourrait peut-être aller jusqu'à -20°C . En ce qui concerne l'essai de perméabilité, l'utilisation d'eau désaérée serait un moyen de réduire les erreurs et les écarts. De plus, les pressions de succion pourraient être augmentées afin de vérifier s'il y a bien une imperméabilité au sein des éprouvettes réparées à la bande. Pour l'essai de traction, le calcul des pourcentage de vides pourrait être fait afin de corréliser ces données avec les résistances maximales de traction.

ANNEXE I

DONNÉES DES ESSAIS D'ARRACHEMENT

Pour chacune des éprouvettes, l'acquisition des données nous permet de générer un graphique. Ce graphique nous donne plusieurs renseignements : la force de résistance maximale brute (en Newton) et la durée de l'essai au bout de laquelle on atteint cette force de résistance maximale (en seconde). Cette durée est appelée t_{max} .

Les graphiques et tableaux qui suivent (voir figures I-1, I-2, I-3, I-4, I-5, I-6, I-7, I-8, I-9, I-10, I-11, I-12, I-13, I-14, I-15 et tableaux I-1, I-2) évoquent une dénomination des éprouvettes particulières. Pour connaître à quoi elle correspond, il faut se référer à la section 3.1.

1. Éprouvette référence

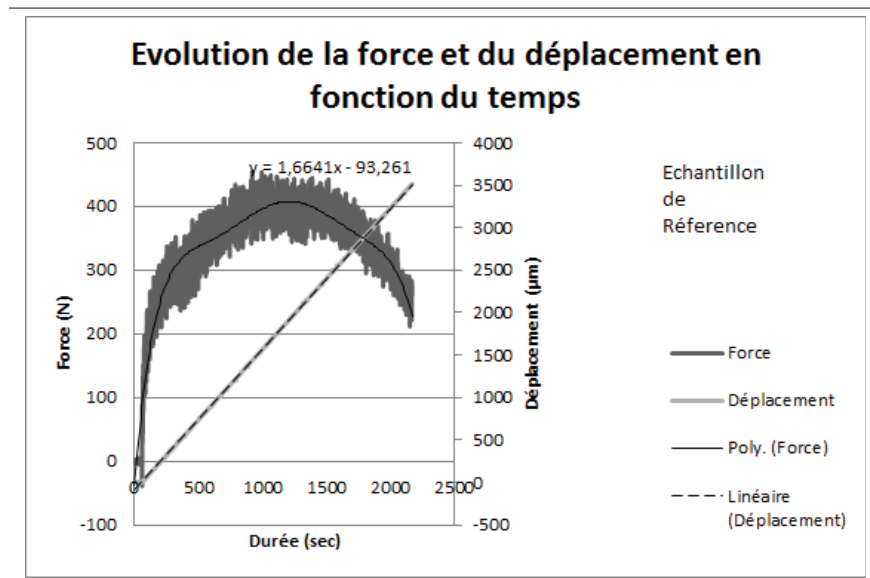


Figure-A I-1 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette référence

2. Éprouvettes réparées au liant d'accrochage

2.1 Avant cycles de gel-dégel

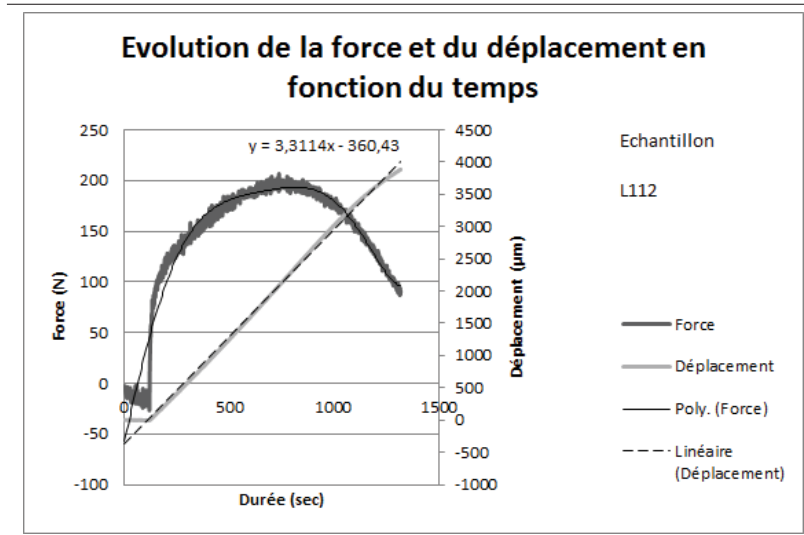


Figure-A I-2 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $L_{1,1,2}$

On voit que pour l'essai de l'éprouvette $L_{1,1,2}$, voir la figure I-2, la vitesse de traction n'est pas conforme au protocole. En effet, le coefficient directeur de la courbe de tendance pour le déplacement (droite en pointsillés) n'est pas égal à 1,667 qui correspond à un déplacement de 0,1 mm/min. En effet,

$$1,667 \mu\text{m}/\text{sec} = 0,1 \text{ mm}/\text{min} \quad (\text{AI-1})$$

On élimine donc cet essai.

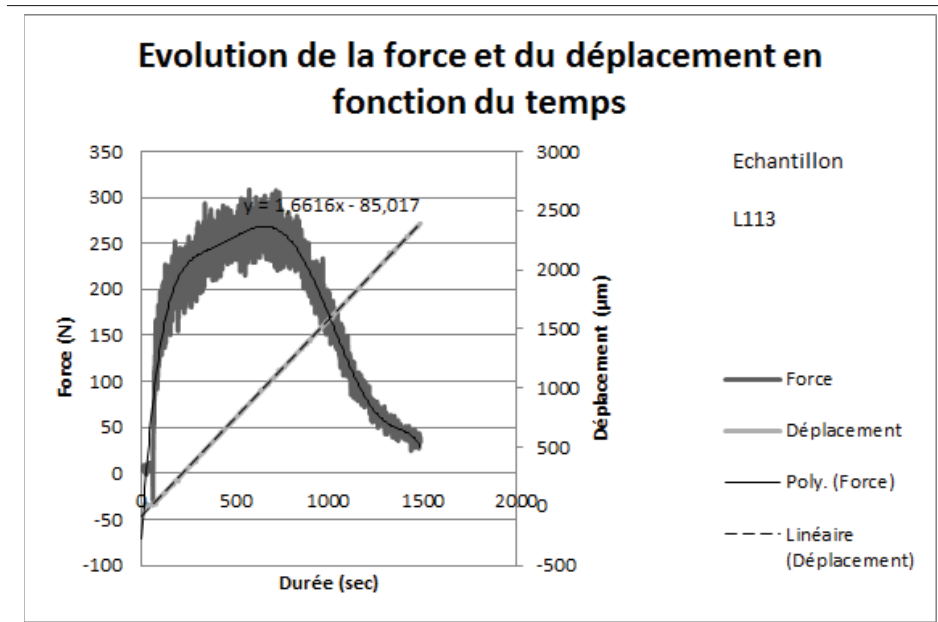


Figure-A I-3 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $L_{1,1,3}$

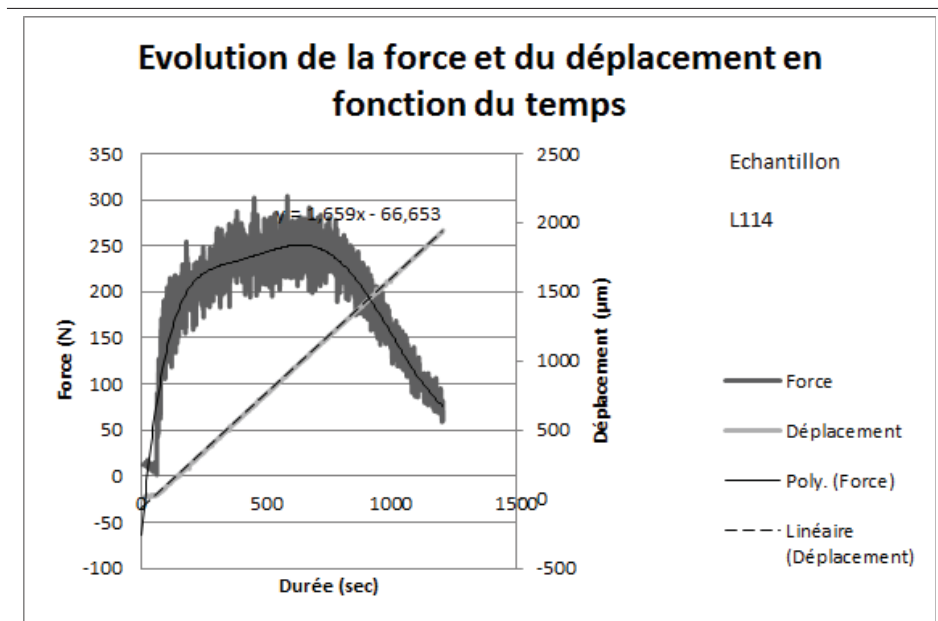


Figure-A I-4 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $L_{1,1,4}$

2.2 Après cycles de gel-dégel

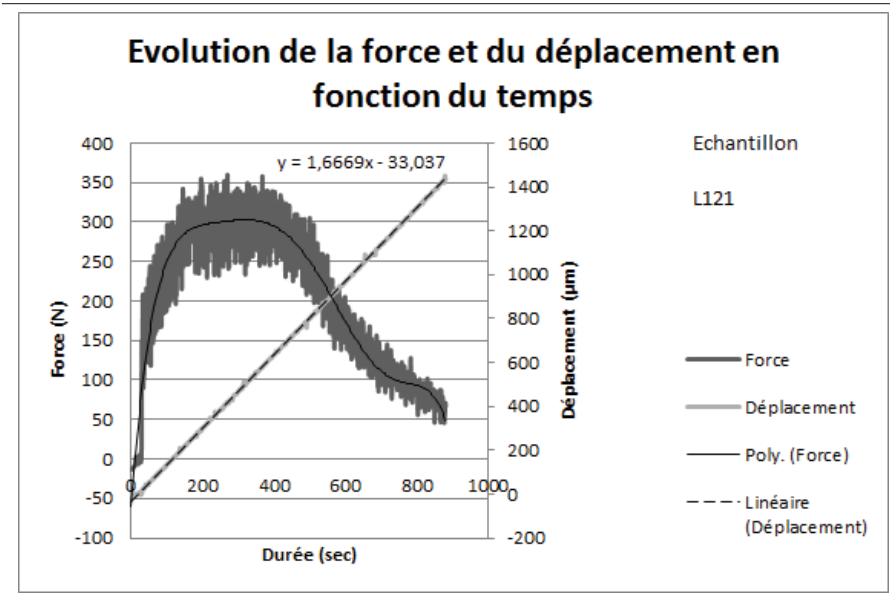


Figure-A I-5 Graphique représentant l’acquisition des données lors de l’essai d’arrachement pour l’éprouvette L_{1,2,1}

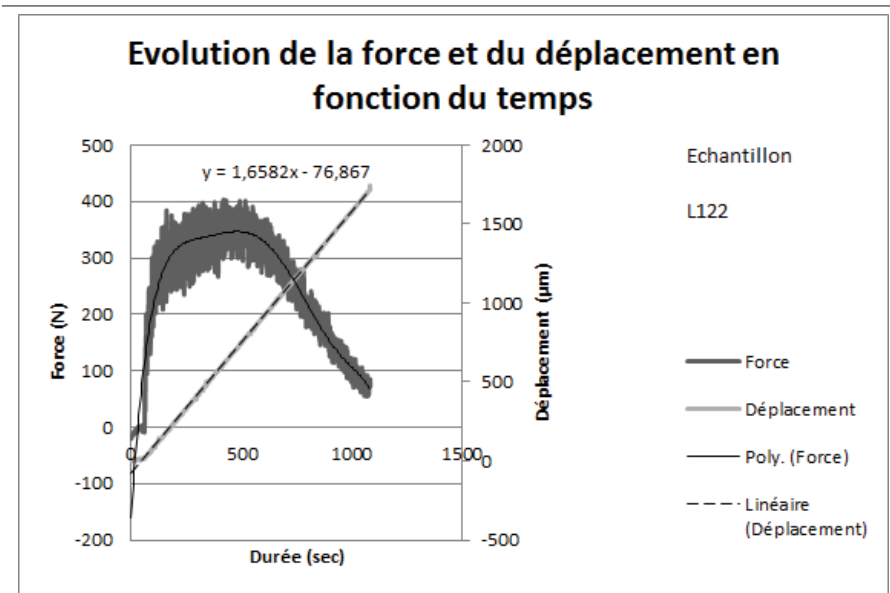


Figure-A I-6 Graphique représentant l’acquisition des données lors de l’essai d’arrachement pour l’éprouvette L_{1,2,2}

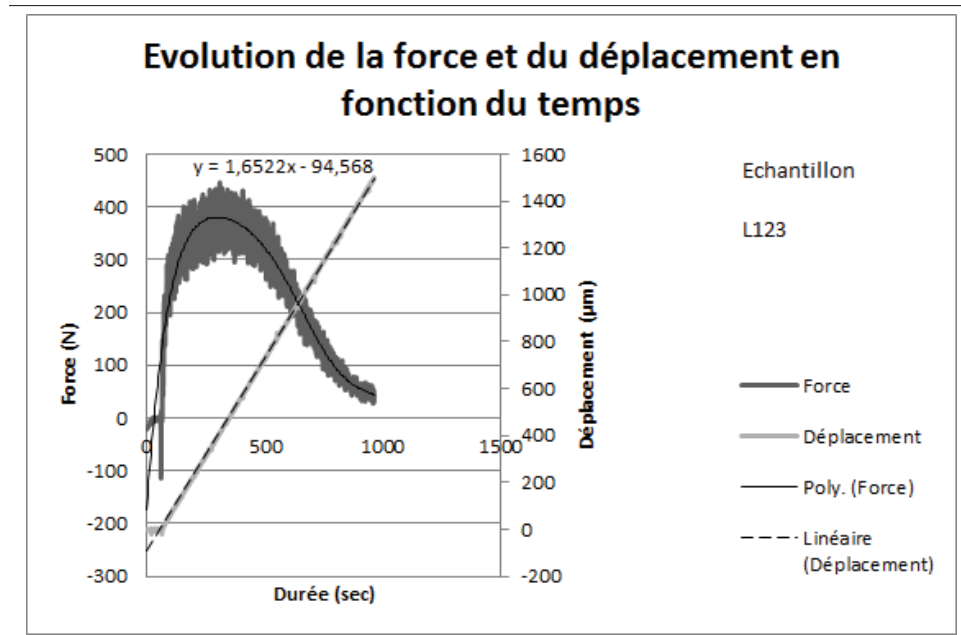


Figure-A I-7 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $L_{1,2,3}$

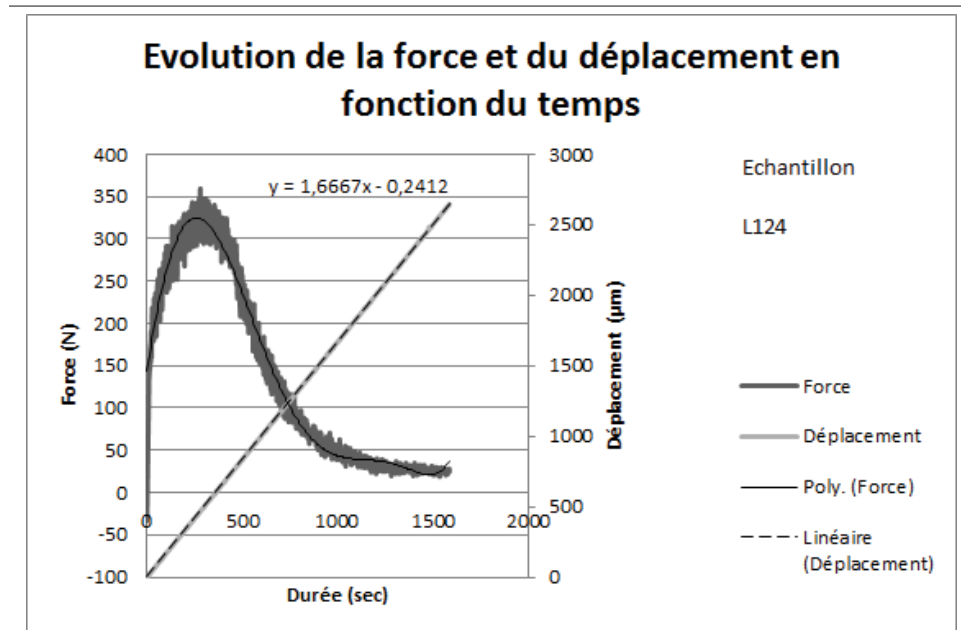


Figure-A I-8 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $L_{1,2,4}$

3. Éprouvettes réparées à la bande bitumineuse

3.1 Avant cycles de gel-dégel

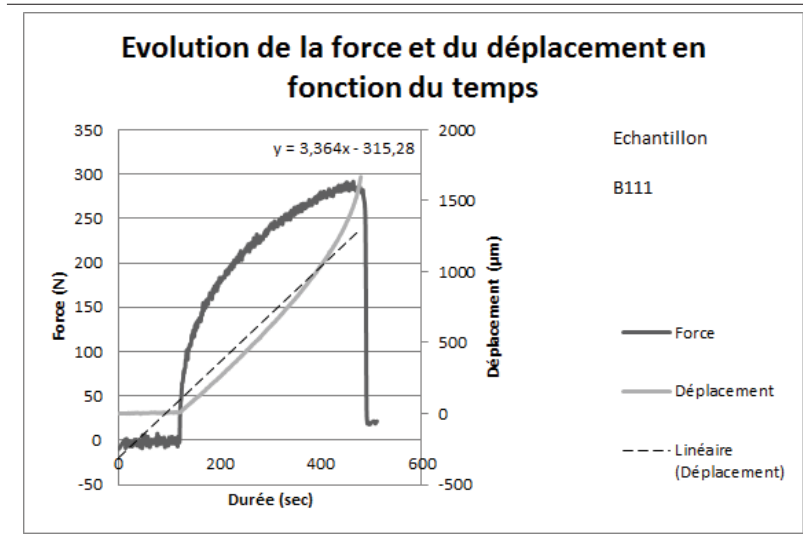


Figure-A I-9 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,1,1}$

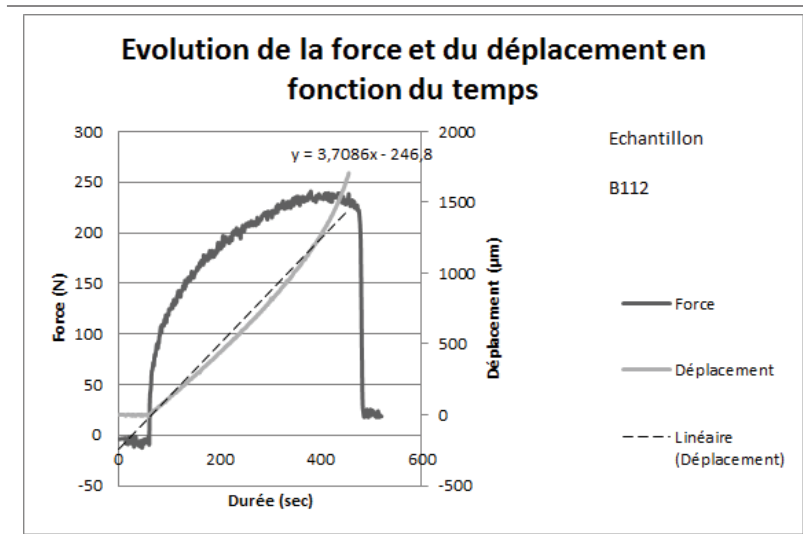


Figure-A I-10 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,1,2}$

De même, ici, on voit que les essais des éprouvettes $B_{1,1,2}$ et $B_{1,1,1}$, voir figures I-9 et I-10, indiquent une mauvaise vitesse de traction. De plus, la forme de ces courbes est particulière. En effet, ces deux éprouvettes ont brisé rapidement pendant l'essai montrant un comportement fragile. Ces deux essais sont éliminés pour le comparatif.

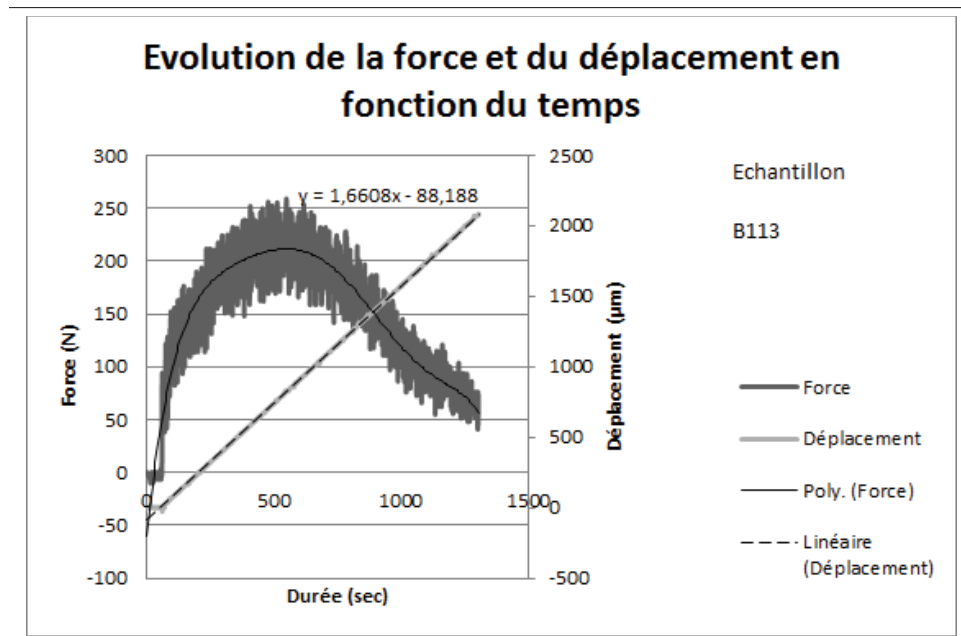


Figure-A I-11 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,1,3}$

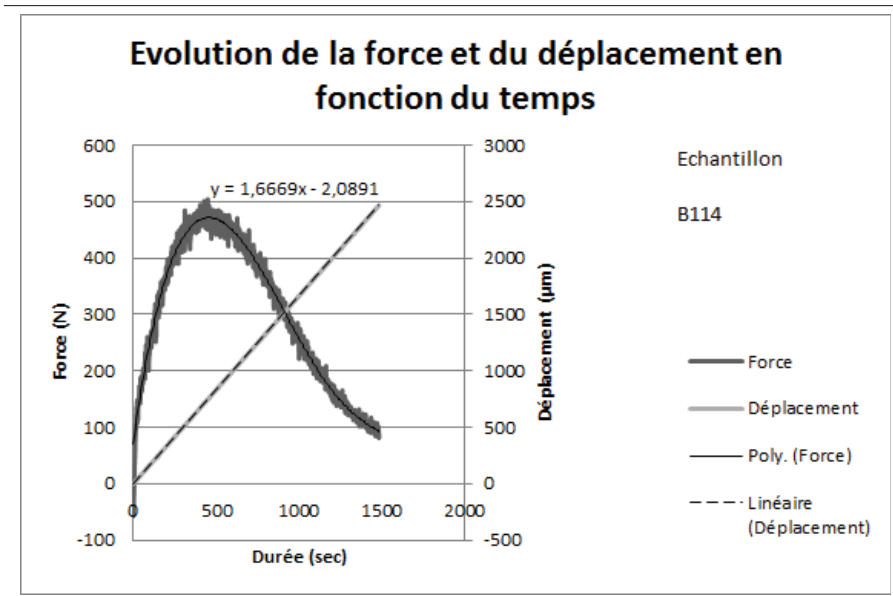


Figure-A I-12 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,1,4}$

3.2 Après cycles de gel-dégel

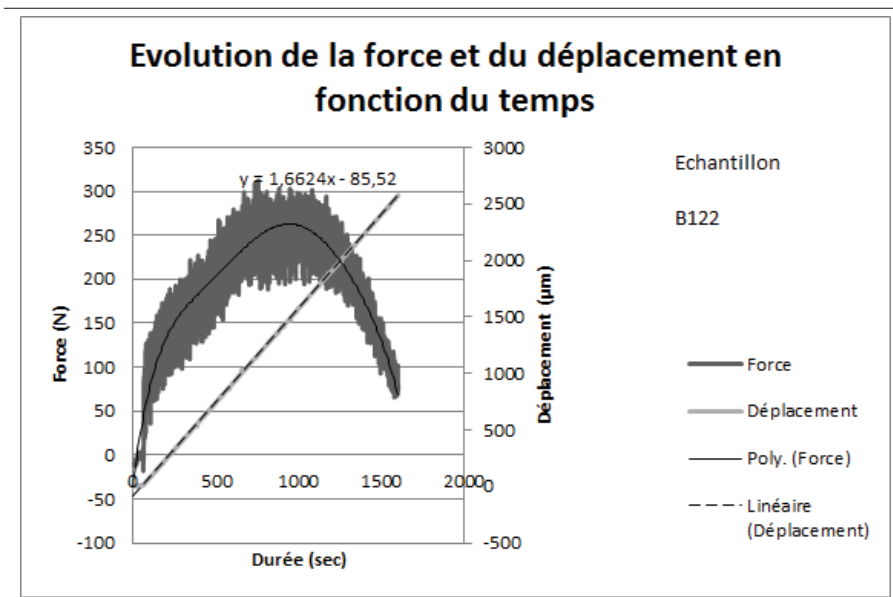


Figure-A I-13 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,2,2}$

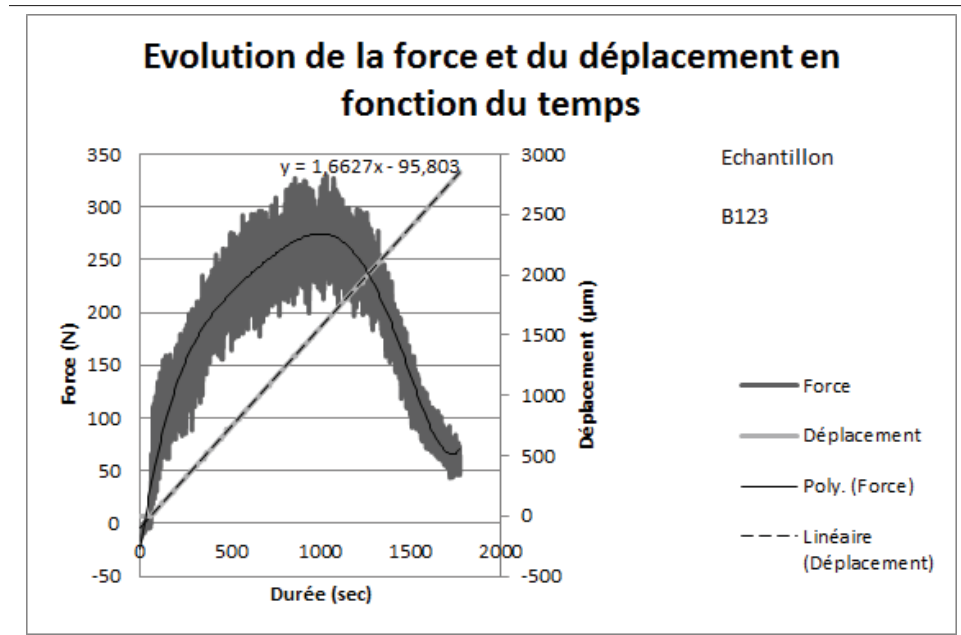


Figure-A I-14 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,2,3}$

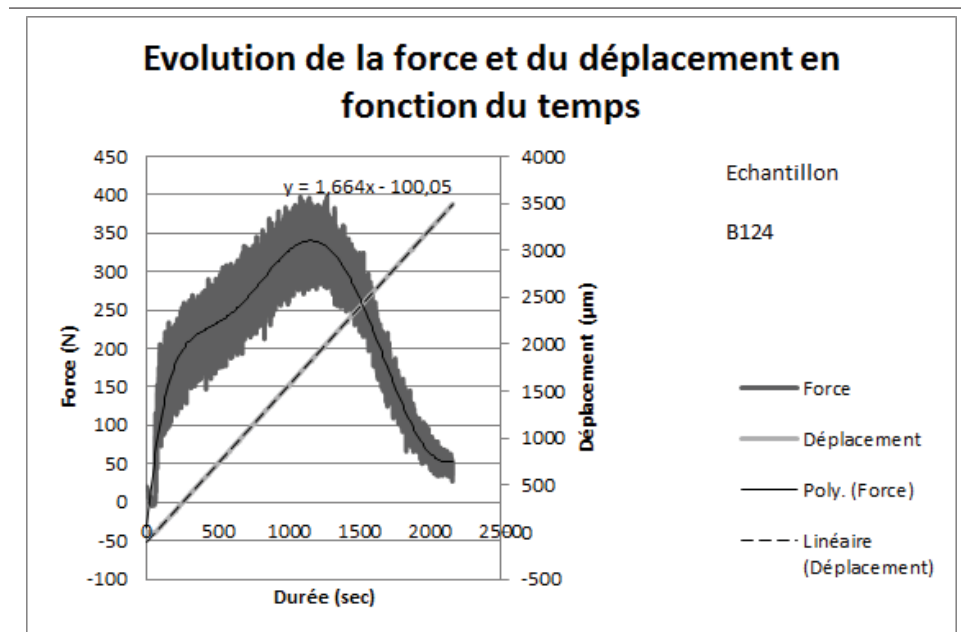


Figure-A I-15 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai d'arrachement pour l'éprouvette $B_{1,2,4}$

4. Tableaux récapitulatifs

4.1 Données brutes

Tableau-A I-1 Tableau récapitulatif des données brutes de l'essai d'arrachement

			Récapitulatif des données					
			Max force (N)	Moyenne (N)		tmax (sec)	Moyenne (sec)	
Référence			471,8			1087,6		
Liant	av CGD	L112	262,4	296,9	350,1	838,9	730,2	530,7
		L113	321,0			700,8		
		L114	307,2			650,9		
	ap CGD	L121	377,9	403,3		303,5	331,2	
		L122	417,5			417,8		
		L123	446,0			275,4		
		L124	371,8			328,3		
	Bande	ap CGD	B122	311,5		352,9	326,3	
B123			333,1	881,9				
B124			414,1	1123,3				
av CGD		B111	292,6	326,3	463,9	462,5		
		B112	243,4		424,9			
		B113	265,7		514,2			
		B114	503,5		447,1			

Les maximums sont pris sur les courbes effectives d'acquisition pour chacune des éprouvettes.

4.2 Données traitées

Avec ces données brutes, on vient modéliser une courbe de tendance pour la courbe représentant la force de résistance. Il s'agit d'une courbe de tendance polynomiale d'ordre 6. L'ordinateur calcule les coefficients de l'équation de la courbe.

$$y = f(x) \quad (\text{AI-2})$$

avec f une fonction polynomiale d'ordre 6.

Afin de déterminer le maximum de la courbe polynomiale, on calcule l'ordonnée de la courbe au point t_{max} .

$$MAX = f(t_{max}) \quad (\text{AI-3})$$

Tableau-A I-2 Tableau récapitulatif des données traitées de l'essai d'arrachement

		Traitement des données							tmax	Maximum calculé	Moyenne		Ecart type	
		Courbe de tendances de degrés 6												
		$y = ax^6+bx^5+cx^4+dx^3+ex^2+fx+g$												
Référence		a	b	c	d	e	f	g						
Liant	av CGD	L112	-3,40E-16	2,42E-12	-6,74E-09	9,26E-06	-6,60E-03	2,44E+00	-3,94E+01	1087,6	403,4	258,8	297,0	11,6
		L113	1,86E-15	-6,96E-12	9,19E-09	-4,68E-06	-1,09E-04	9,28E-01	-5,79E+01	838,9	193,2			
		L114	-3,42E-15	1,68E-11	-3,15E-08	2,85E-05	-1,33E-02	3,18E+00	-7,26E+01	700,8	267,0			
	ap CGD	L121	-3,61E-15	1,73E-11	-3,19E-08	2,83E-05	-1,30E-02	3,06E+00	-6,43E+01	650,9	250,6	335,2	34,0	
		L122	-9,16E-14	2,58E-10	-2,80E-07	1,49E-04	-4,18E-02	6,06E+00	-6,15E+01	303,5	302,3			
		L123	-2,17E-14	8,13E-11	-1,18E-07	8,48E-05	-3,20E-02	6,21E+00	-1,63E+02	417,8	343,7			
		L124	-2,90E-14	9,72E-11	-1,28E-07	8,53E-05	-3,23E-02	6,59E+00	-1,77E+02	275,4	379,2			
		L124	1,01E-15	-4,28E-12	5,59E-09	-7,60E-07	-3,14E-03	1,49E+00	1,43E+02	328,3	315,6			
Bande	ap CGD	B122	-7,08E-16	3,90E-12	-8,44E-09	8,86E-06	-4,84E-03	1,51E+00	-3,43E+01	755,4	248,6			
		B123	1,82E-16	-4,25E-13	-4,70E-10	2,01E-06	-2,13E-03	1,13E+00	-2,52E+01	881,9	269,5			
		B124	-2,81E-16	2,20E-12	-6,44E-09	8,76E-06	-5,79E-03	1,91E+00	-3,29E+01	1123,3	339,4			
	av CGD	B111												
		B112												
		B113	-3,53E-15	1,52E-11	-2,53E-08	2,08E-05	-9,36E-03	2,34E+00	-6,07E+01	514,2	210,6			
		B114	-3,46E-16	1,56E-12	-2,97E-09	3,93E-06	-4,18E-03	2,19E+00	6,94E+01	447,1	471,0			

À noter que pour les éprouvettes réparées à la bande, on ne prend que les données pour l'éprouvette rabotée ($B_{1,1,4}$), voir figure 6.3.

ANNEXE II

DONNÉES DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Le protocole expérimental impose que 3 à 4 essais consécutifs doivent être réalisés sur chacune des éprouvettes. Ces essais sont identifiés par les lettres A, B, C et D. A étant le premier essai et D le dernier, s'il a lieu.

De même que précédemment, les dénominations des éprouvettes (voir tableaux II-1, II-2, II-3, II-4 et figures II-1 et II-2) sont à identifier dans la section 3.1 du présent rapport.

On rappelle que les données sont des mesures de la durée que met une burette de 100 mL d'eau distillée pour s'écouler dans l'échantillon sous une pression négative de succion de -100 kPa.

1. Éprouvette avec joint horizontal

1.1 Avant cycles de gel-dégel

Tableau-A II-1 Tableau récapitulatif des données de l'essai de perméabilité avant CGD pour les éprouvettes avec un joint horizontal

Eprouvettes		Mesures (seconde)				Résultats (seconde)				
		A	B	C	D	Moyenne	Ecart type	Ecart type relatif	Moyenne par famille	Ecart type par famille
Réf	R1	1058	1002	1028	1002	1022,5	26,65	0,03	1084,67	365,24
	R2	1499	1300	1632		1477	167,09	0,11		
	R3	663	725	772	858	754,5	82,18	0,11		
Liant	L211	366	390	412	442	402,5	32,35	0,08	409,88	64,14
	L212	335	350	367	377	357,25	18,55	0,05		
	L213	493	517	488	510	502	13,74	0,03		
	L214	365	389	387	370	377,75	12,04	0,03		
Bande	B211	∞	∞	∞	∞	∞			∞	
	B212	∞	∞	∞	∞	∞				
	B213	∞	∞	∞	∞	∞				
	B214	∞	∞	∞	∞	∞				

1.2 Après cycle de gel-dégel

Tableau-A II-2 Tableau récapitulatif des données de l'essai de perméabilité après CGD pour les éprouvettes avec un joint horizontal

Eprouvettes		Mesures (seconde)				Résultats (seconde)				
		A	B	C	D	Moyenne	Ecart type	Ecart type relatif	Moyenne par famille	Ecart type par famille
Liant	L221	835	954	1112	1270	1042,75	189,27	0,18	929,63	257,74
	L222	805	1071	1134	1326	1084	215,31	0,20		
	L223	890	965	1090	1246	1047,75	155,80	0,15		
	L224	411	479	594	692	544	124,26	0,23		
Bande	B221	∞	∞	∞	∞	∞			∞	
	B222	∞	∞	∞	∞	∞				
	B223	∞	∞	∞	∞	∞				
	B224	∞	∞	∞	∞	∞				

2. Éprouvette avec joint vertical

2.1 Avant cycles de gel-dégel

Tableau-A II-3 Tableau récapitulatif des données de l'essai de perméabilité avant CGD pour les éprouvettes avec un joint vertical

Eprouvettes		Mesures (secondes)				Résultats (secondes)				
		A	B	C	D	Moyenne	Ecart type	Ecart type relatif	Moyenne par famille	Ecart type par famille
Ref	R1	1058	1002	1028	1002	1022,5	26,65	0,03	1084,67	365,24
	R2	1499	1300	1632		1477	167,09	0,11		
	R3	663	725	772	858	754,5	82,18	0,11		
Liant	L'211	712	695	754	773	733,5	36,17	0,05	461,38	223,55
	L'212	483	510	523	543	514,75	25,14	0,05		
	L'213	376	393	401	425	398,75	20,37	0,05		
	L'214	197	197	199	201	198,5	1,91	0,01		
Bande	B'211	∞	∞	∞	∞	∞			∞	
	B'212	∞	∞	∞	∞	∞				
	B'213	∞	∞	∞	∞	∞				
	B'214	∞	∞	∞	∞	∞				

2.2 Après cycle de gel-dégel

Tableau-A II-4 Tableau récapitulatif des données de l'essai de perméabilité après CGD pour les éprouvettes avec un joint vertical

Eprouvettes		Mesures (secondes)				Résultats (secondes)				
		A	B	C	D	Moyenne	Ecart type	Ecart type relatif	Moyenne par famille	Ecart type par famille
Liant	L'221	260	263	267	272	265,5	5,2	0,02	436,50	187,81
	L'222	273	288	301	322	296,0	20,8	0,07		
	L'223	613	649	677	688	656,8	33,5	0,05		
	L'224	507	528	543	533	527,8	15,2	0,03		
Bande	B'221	∞	∞	∞	∞	∞			∞	
	B'222	∞	∞	∞	∞	∞				
	B'223	∞	∞	∞	∞	∞				
	B'224	∞	∞	∞	∞	∞				

3. Graphiques récapitulatifs

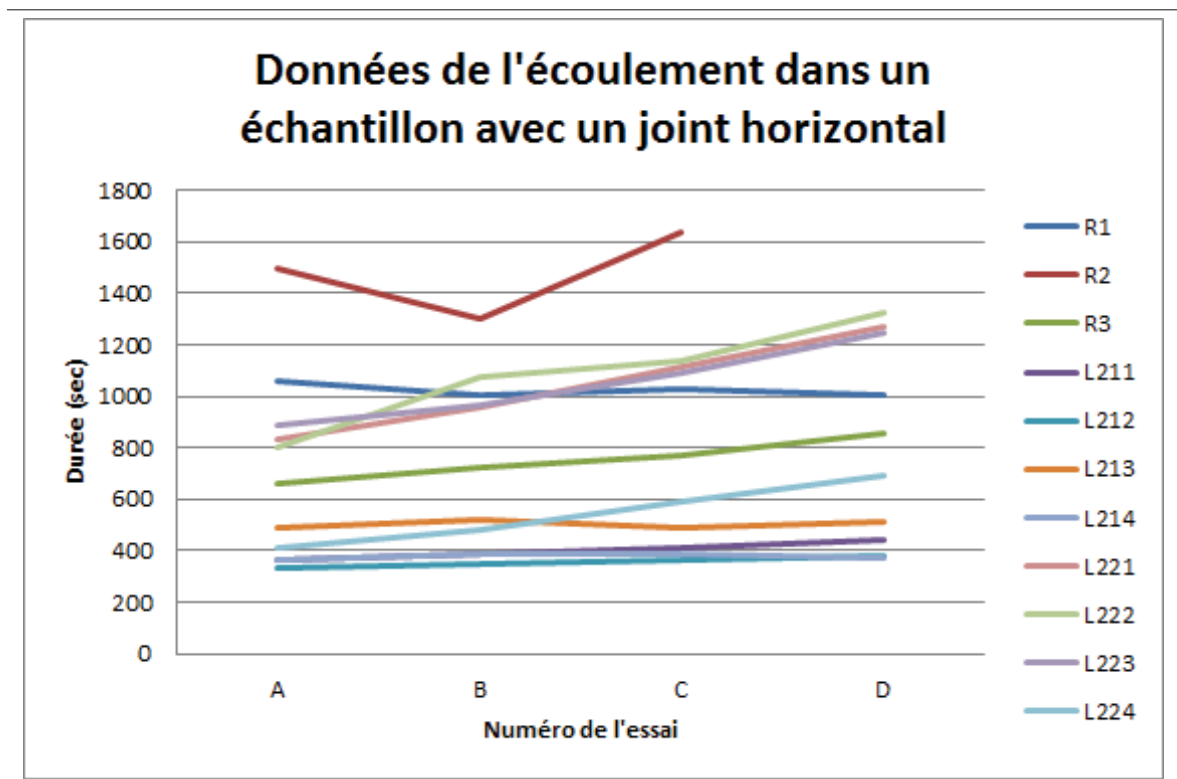


Figure-A II-1 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai de perméabilité pour les éprouvettes avec un joint horizontal

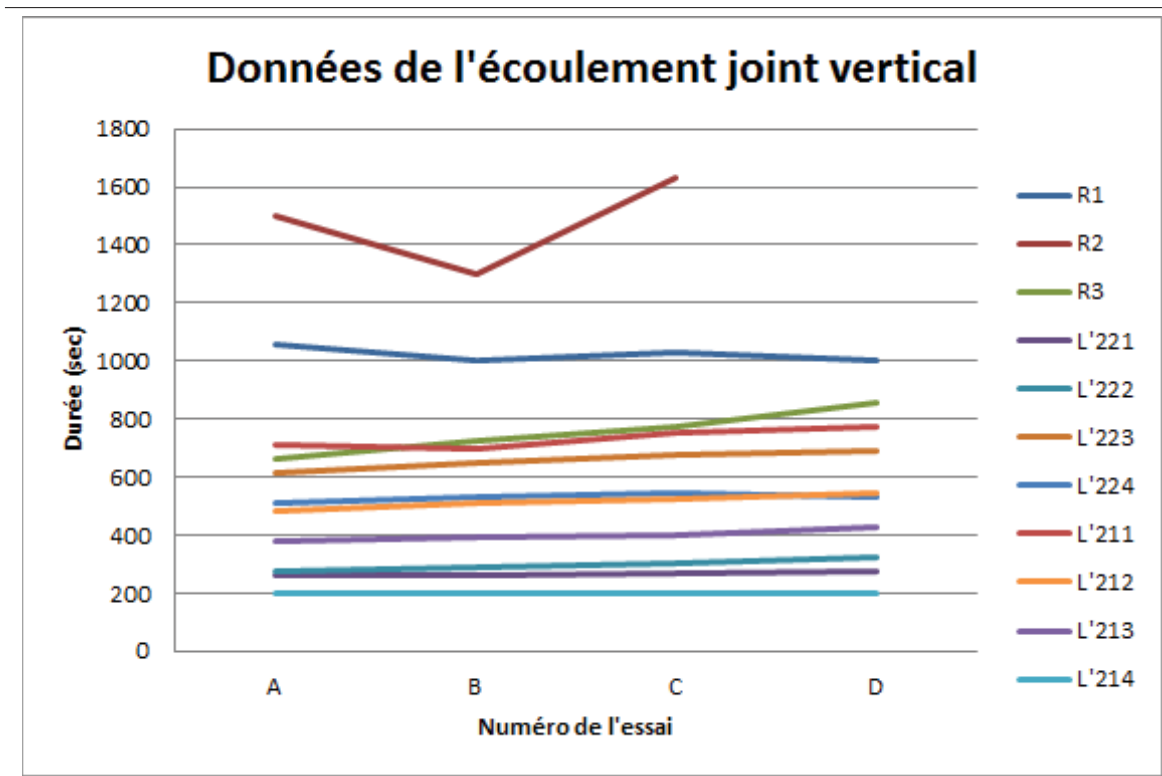


Figure-A II-2 Graphique représentant l'acquisition des données lors de l'essai de perméabilité pour les éprouvettes avec un joint vertical

BIBLIOGRAPHIE

- ASTM. 2009. « D5329-09 : Standard Test Methods for Sealants and Fillers, Hot Applied, for Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements ».
- ASTM. 2012. « D6690-12 : Standard Specification for Joint and Crack Sealants, Hot Applied, for Concrete and Asphalt Pavements ».
- Bitume-Québec. 2008. « Guide de Bonnes Pratiques : La mise en oeuvre des enrobés ».
- Bitume-Québec. 2010. « Profil de l'industrie de la chaussée souple au Québec ».
- Denso. 2014. « Catalogue Denso : Produits d'étanchéité innovants ».
- LeBec, S. 2012. « Les émulsions de bitume : Formulation et Fabrication selon leur usage (Bitume-Québec) ».
- Miard, L. 2010. « Cotita Centre Est Club entretien 2010, "Les tranchées : Présentation du référentiel technique en application" ».
- MTQ. 2011. « Méthode d'essai LC25-011 : Préparation d'éprouvettes de laboratoire afin d'évaluer la force de liaison d'une émulsion d'accrochage ».
- MTQ. 2013. « Méthode d'essai LC26-040 : Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés ».
- MTQ. 2014a. « Méthode d'essai LC26-045 : Détermination de la densité maximale ».
- MTQ. 2014b. « Méthode d'essai LC26-400 : Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC ».
- Paradis, M. 2008. « Les enrobés du MTQ : relation entre leurs caractéristiques, leur mise en oeuvre et leur performance sur la route ». In *Colloque Bitume Québec : La mise en oeuvre des enrobés bitumineux*. (Boucherville, Québec 2008).
- Perraton, D., M. Meunier, et A. Carter. 2007. « Application des méthodes d'empilement granulaire à la formulation des Stones Matrix Asphalt (SMA) ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 270-271, n° 22, p. 87-108.
- Roy, A. 2009. « Adhésifs pour joints ».
- Trudeau, S. 2003. « La sélection et les caractéristiques des liants d'accrochage ». In *Les journées du bitume*.

La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

ISBN 978-2-9813046-8-1

Tous droits réservés. ©
CERIU, avril 2018



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines

1255, boul. Robert-Bourassa, bur. 800
Montréal (Québec) H3B 3W3
Canada

514 848-9885

info@ceriu.qc.ca
www.ceriu.qc.ca