

Rapport

Vers la généralisation de
l'incorporation de granulats
bitumineux récupérés (GBR)
dans les travaux routiers
municipaux au Québec

Équipe solution #3.2 –
Généralisation des GBR

Étape : rapport final



Auteur : Éric Lachance-Tremblay, Diego
Ramirez Cardona, Marc-André Bérubé,
Sébastien Lamothe

Date : 12 décembre 2023

Table des matières

1. Mise en contexte.....	2
2. Objectifs du projet	2
3. L'utilisation de granulats bitumineux récupérés au Québec.....	4
3.1. HISTORIQUE DE L'UTILISATION DES GBR DANS LES ENROBÉS AU QUÉBEC.....	4
3.1.1. Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD)	4
3.1.2. Ville de Montréal	5
3.2. PRATIQUES ACTUELLES D'UTILISATION DE GBR AU QUÉBEC.....	6
4. Le cas d'étude du Chemin du Lac Bleu à Saint-Hippolyte	7
5. Résultats du projet.....	8
5.1. CARACTÉRISATION PRÉPARATOIRE DU « CHANTIER »	8
5.2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE RÉALISÉS SUR LES ÉCHANTILLONS	9
5.3. RÉSULTATS DES ESSAIS DE CHANTIER	11
5.4. Caractérisation de l'enrobé en laboratoire pour les phases « formulations » et « production » ..	12
5.5. MISE EN PLACE DE L'ENROBÉ AU « CHANTIER »	13
6. Discussion et apprentissage.....	14
6.1. Performances mécaniques des enrobés avec fort taux de GBR	14
6.2. INTÉGRATION DU PROJET PILOTE ET DES CLAUSES DE PERFORMANCES DANS LE DEVIS	17
6.3. Contexte particulier de l'industrie québécoise des enrobés bitumineux.....	18
7. Conclusion et éléments à considérer	20
8. Références.....	21
Annexe : résultats détaillés de la caractérisation de l'enrobé	22

1. Mise en contexte

Le présent projet s'inscrit dans la mission du Laboratoire sur les chaussées et les matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) de développer, promouvoir et accompagner l'implémentation durable de solutions technologies innovantes et soutenables dans le domaine de la construction et entretien des chaussées au Canada. Ce projet a été réalisé et financé dans le cadre du lab construction du Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire (CERIEC) de l'ÉTS, qui vise à accélérer la transition vers l'économie circulaire du secteur de la construction, et par la Municipalité de Saint-Hippolyte.

Actuellement, l'utilisation de granulats bitumineux récupérés (GBR) est observée comme l'avenue avec le plus de potentiel pour **réduire effectivement et de façon importante l'impact environnemental de la construction routière** au niveau global [1]–[3]. En effet, l'utilisation de GBR **réduit significativement l'utilisation de matières premières** (granulats vierges et bitume neuf) dans la construction et l'entretien des routes. De plus, la valorisation des GBR rend possible l'application de techniques de retraitement sur place des vieilles chaussées, c'est-à-dire, leur **recyclage in situ** pour le renouvellement des routes. Ces techniques **réduisent considérablement les émissions de gaz à effet de serre (GES) dues au transport** des matériaux pour la construction et l'entretien des routes.

De surcroît, les enrobés bitumineux figurent parmi les matériaux de construction les plus recyclables qui existent. Des études démontrent que **le bitume et les granulats présents dans les chaussées existantes peuvent être soumis à de multiples cycles de recyclage sans altérer de manière significative les performances ou la durabilité des infrastructures** [4]. Certes, cela nécessite l'utilisation d'agents de rajeunissement pour contrer les effets du vieillissement naturel du bitume, mais de plus en plus de ces agents proviennent également de l'économie circulaire, telle que les huiles usagées ou les sous-produits de l'industrie papetière [5].

Malgré l'abondance de preuves dans la littérature scientifique internationale confirmant les excellentes performances mécaniques des enrobés à fort taux de GBR, et les différentes méthodologies exposées pour leur formulation et leur fabrication correctes, le contexte climatique et industriel particulier au Québec exige une approche approfondie à l'échelle locale. Ceci vise à garantir des performances adéquates, notamment à des températures basses pour les enrobés québécois utilisant de forts dosages en GBR provenant de sources locales.

Cependant, la **transition vers une utilisation étendue et durable des enrobés à forts taux de GBR** demande en plus, et surtout, un ample travail de recherche et développement en dehors de la formulation en laboratoire d'enrobés bitumineux. Les disparités dans les exigences techniques d'un lieu à l'autre, la rigidité du cadre contractuel normatif ne laissant guère de place à l'innovation, ainsi que la méconnaissance et les idées préconçues entourant l'utilisation des GBR sont autant d'exemples de barrières entravant la généralisation de l'utilisation des enrobés à forts taux de GBR au Québec.

2. Objectifs du projet

Afin de **contribuer significativement à la standardisation des enrobés bitumineux contenant des taux importants (supérieurs à 20 %) de GBR au Québec**, ce projet a comme objectif principal la proposition d'une feuille de route pour réussir la généralisation de l'incorporation de GBR dans les travaux routiers municipaux dans la province. La construction de cette feuille de route reposera sur les observations et les enseignements tirés d'une étude de cas concrète, dans un contexte

économique et technique représentatif de la réalité québécoise. L'étude de cas a consisté en la préparation et la réalisation du chantier de réhabilitation du chemin du Lac Bleu en **collaboration avec la Ville de Saint-Hippolyte**.

Pour réaliser cet objectif, le projet englobe deux objectifs spécifiques dans le cadre de l'étude de cas :

- 1) la caractérisation des performances mécaniques de l'enrobé bitumineux à fort dosage en GBR et
- 2) l'analyse des différentes étapes de préparation et de réalisation d'un projet de réhabilitation.

Concernant le premier objectif spécifique, un recueil historique et une étude comparative des différentes pratiques relatives à l'utilisation de GBR au Québec ont été réalisés. De plus, une étude complète de caractérisation des performances de l'enrobé de type ESG-10 avec 30 % de GBR a été réalisée en laboratoire. Cette étude comprend la caractérisation de la résistance à la déformation permanente (ou à l'orniérage), de la résistance à la fissuration thermique et de la tenue (ou résistance) à l'eau. L'étude a été réalisée tant sur l'enrobé fabriqué en laboratoire avec les matériaux de base de la formule prévue pour le chantier que sur l'enrobé prélevé du chantier. Les résultats de ces études ont servi de base pour l'identification des défis d'ordre technique en lien avec la fabrication à grande échelle d'enrobés à forts dosages de GBR et pour l'établissement de recommandations pour le contrôle de qualité du matériau.

Concernant le deuxième objectif spécifique, les réussites et les contretemps du projet ont été consignés dans ce document et analysés sous la lumière des relations et interactions entre les différentes parties prenantes pendant les différentes étapes de la préparation et de la réalisation du chantier. Ceci a permis de mieux caractériser et identifier les défis organisationnels présents dans l'industrie québécoise.

Les livrables de ce travail constituent un point de référence pour de futurs projets de construction ou d'entretien des routes avec des enrobés à forts dosages de GBR. L'étude de cas qui fait l'objet de ce projet a permis de **constater les principaux défis** de la généralisation de ces matériaux dans la province. Ce rapport contient des **recommandations à destination des donneurs d'ouvrage** concernant la préparation de projets de construction ou d'entretien des routes avec des enrobés à forts dosages en GBR. Ces recommandations visent à donner les outils nécessaires pour s'assurer que les matériaux qui seront utilisés correspondent bien aux besoins des maîtres d'ouvrage en termes de performance mécanique et de durabilité.

La composition de l'équipe du projet était la suivante :

- Éric LACHANCE-TREMBLAY, professeur au département de Génie de la construction de l'ÉTS;
- Diego RAMIREZ CARDONA, professeur au département de Génie de la construction de l'ÉTS;
- Michel VAILLANCOURT, professeur au département de Génie de la construction de l'ÉTS;
- Mathieu MEUNIER, directeur général de la Municipalité de Saint-Hippolyte;
- Sébastien LAMOTHE, associé de recherche au LCMB de l'ÉTS;
- Marc-André BÉRUBÉ, étudiant au doctorat à l'ÉTS.

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

3. L'utilisation de granulats bitumineux récupérés au Québec

L'utilisation de GBR au Québec est marquée par l'évolution de la réglementation provinciale depuis la fin des années 80s. Il est évident que les pratiques au niveau municipal suivent les pratiques adoptées par le gouvernement provincial. Néanmoins, les efforts entrepris par certaines municipalités, telles que la Ville de Montréal, ont aussi constitués des moteurs impulsant l'utilisation de GBR dans la province.

Les sections suivantes comprennent un historique du cadre normatif régissant l'utilisation de GBR au Québec, ainsi qu'une étude comparative des pratiques en la matière dans différentes villes de la province.

3.1. HISTORIQUE DE L'UTILISATION DES GBR DANS LES ENROBÉS AU QUÉBEC

La première réglementation relative à l'utilisation de GBR au Québec date de 1986, où les taux permis montaient jusqu'à 60 % selon le type de centrale d'enrobage utilisé. Depuis et jusqu'en 2009, le taux permis de GBR dans le réseau du Ministère des Transports et de la mobilité durable (MTMD) du Québec a été progressivement réduit. En 1993, une interdiction d'utilisation de GBR dans les couches de roulement des autoroutes est entrée en vigueur, bien que l'utilisation de GBR à des taux relativement élevés ait été autorisée dans d'autres cas. C'est en 2009 que le taux de GBR permis dans le réseau MTMD a atteint son niveau le plus bas, avec un maximum de 15 % de GBR pour les formules autres que celles destinées aux couches de roulement d'autoroute.

Toutefois, la même année, ce taux maximal permis a été réévalué à 20 % et en 2013, le MTMD a permis un maximum de 10 % de GBR dans les couches de surface pour autoroute. Cette tendance d'acceptation du GBR dans les enrobés est aussi observée depuis lors dans le milieu municipal, notamment à Montréal, où des variations aux proportions stipulées sont permises sous réserve d'une évaluation par leur service technique et dans le cadre de projets pilotes.

On constate ainsi une évolution de la réglementation en faveur d'une augmentation des taux de GBR autorisés tant au niveau provincial que municipal, en lien avec les avancées techniques et la compréhension accrue du comportement mécanique des enrobés contenant du GBR. Le projet pilote (cas d'étude) avec la ville de Saint-Hyppolite vise à générer des résultats et des expériences pour poursuivre cette tendance.

Les paragraphes suivants détaillent les différents moments clés de l'histoire de l'utilisation des GBR au Québec, particulièrement vis-à-vis du MTMD et de la Ville de Montréal.

3.1.1. Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD)

La réglementation du MTMD est indiquée au sein des cahiers des charges et devis généraux (CCDG). Aussi, les CCDG font référence à la norme 4201 (anciens) ou 4202 (enrobés actuels).

- CCDG 1986 : « Le taux maximum du vieil enrobé bitumineux recyclé permis est de 30 % pour une centrale d'enrobage conventionnelle et de 60 % pour une centrale à tambour-sécheur-malaxeur. » **Norme 4201**
- CCDG 1993 : « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés pour couche de roulement d'autoroute ou lorsque indiqué aux plans et devis. Dans les autres cas, le taux de recyclage permis est de : 20 % dans le cas des enrobés pour couche de roulement et 40 % dans le cas des enrobés pour couche de base et couche unique. » **Norme 4201**
- CCDG 1997 : « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés pour couche de roulement d'autoroute ou lorsque cela est stipulé aux plans et devis. Dans les autres cas, le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 20 %; » **Norme 4201**

- CCDG 1999 : « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés pour couche de roulement d'autoroute ou lorsque cela est stipulé aux plans et devis. Dans les autres cas, le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 20 %; » **Norme 4201** & « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées. » **Norme 4202**
- CCDG 2001 : « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés pour couche de roulement d'autoroute ou lorsque cela est stipulé aux plans et devis. Dans les autres cas, le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 15 %; » **Norme 4201** & « Seuls les matériaux vierges sont permis dans les enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées. » **Norme 4202**
- CCDG 2007 : « Seuls les matériaux neufs sont permis dans la fabrication des enrobés pour couche de roulement d'autoroute. Dans les autres cas, le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 15 %. » **Norme 4202**
- CCDG 2009 : « Seuls les matériaux neufs sont permis dans l'enrobé pour couche de roulement d'autoroute. Dans les autres cas, le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 20 % de la masse des granulats. » **Norme 4202**
- CCDG 2013 : « (...) l'utilisation de granulats bitumineux récupérés (GBR) est limitée à 20 % de la masse des granulats. Dans le cas des enrobés pour couche de surface d'autoroute (y inclus les bretelles d'autoroute, les collecteurs et les accotements), ce pourcentage est de 10 % maximum. »
- **Norme 4202 (2022-12-15)** : « L'utilisation de GBR est limitée à 20,0 % de la masse des granulats. Ce pourcentage est de 10,0 % au maximum dans le cas des enrobés pour couche de surface d'autoroute (y compris les bretelles, les voies latérales, les collecteurs et les accotements, à l'exclusion des chemins de déviation). »

3.1.2. Ville de Montréal

La réglementation de la Ville de Montréal est indiquée au sein du document technique 4VM-10 ou DTNI-10B (ancienne ou nouvelle nomenclature) spécifique aux "Enrobés à chaud".

- 4VM-10 (2006) : « Sauf si autrement spécifié dans les documents contractuels, les granulats bitumineux récupérés peuvent être utilisés dans la fabrication des enrobés uniquement lorsque la catégorie b est spécifiée pour les caractéristiques de fabrication du gros granulat. Le pourcentage de granulats bitumineux récupérés est limité à 15 %. »
- 4VM-10 (2013) : « Sauf si autrement spécifié dans les documents contractuels, les granulats bitumineux recyclés peuvent être utilisés dans la fabrication d'enrobés. Pour les couches de base, un maximum de 20 % est permis, alors que pour les couches de surface dont la température H de la classe de performance est d'au plus 64 °C, un maximum de 10 % est autorisé. »
- 4VM-10 (2017) : « L'utilisation des GBR dans la fabrication des enrobés est limitée à 20 % de la masse des granulats. Dans le cas des enrobés pour une couche de surface d'une rue dans laquelle la circulation de camions est permise en tout temps (...) ou dans l'emprise d'une voie réservée pour la circulation d'autobus (...), et ce, peu importe la plage horaire qui lui est associée, ce pourcentage est limité à 10 %. »
- 4VM-10 (2019) ajout du paragraphe suivant : « Un mélange bitumineux qui serait produit avec des proportions différentes que celles décrites précédemment devra faire l'objet d'une demande d'évaluation adressée à la DEST.¹ avant son approbation pour une utilisation sur le réseau routier de la Ville. »

¹ DEST : Division de l'expertise et du soutien technique.

- DTNI-10B (2021) : « L'utilisation des GBR dans la fabrication des enrobés est limitée à 20 % de la masse des granulats. Par contre, dans le cas des enrobés pour une couche de surface d'une rue dans laquelle la circulation de camions est permise en tout temps (...) et/ou lorsqu'il y a circulation d'autobus, ce pourcentage est limité à 10 %. (...) Un mélange bitumineux qui serait produit avec des proportions différentes que celles décrites précédemment devra faire l'objet d'une demande d'évaluation adressée par courriel à la DEST (...) avant son approbation pour une utilisation sur le réseau routier de la Ville dans le cadre d'un projet pilote. »

3.2. PRATIQUES ACTUELLES D'UTILISATION DE GBR AU QUÉBEC

Au Québec, il y a une certaine variabilité en termes d'utilisation de GBR dans les travaux municipaux. Bien que la plupart des villes de la province adoptent les préconisations du MTMD, il y a des villes plus restrictives quant à l'utilisation de GBR, et d'autres qui offrent plus de possibilités aux entrepreneurs. Le Tableau 1 présente un aperçu des pratiques actuelles d'utilisation de GBR dans les différentes villes au Québec. Il est possible d'observer que seul **un donneur d'ouvrage (la Ville de Montréal) permet des taux de GBR supérieurs à 20 % et que certaines municipalités interdisent même l'utilisation de GBR.**

En comparaison, les États américains frontaliers du Vermont et du Maine autorisent des taux de GBR respectifs de 50 % et 30 % sur l'ensemble de leur territoire. À titre d'exemple, la **Ville de New York (NY)**, aux États-Unis, requiert une **utilisation minimale de 30 % de GBR** dans les enrobés pour ses projets municipaux. Compte tenu de la similitude du contexte climatique entre ces états et les régions du sud du Québec, il apparaît qu'il existe une marge d'amélioration techniquement possible en matière d'utilisation de GBR dans les travaux municipaux dans la province.

Tableau 1. Pratiques actuelles en matière d'utilisation de GBR au Québec

Donneur d'ouvrage	Teneur en GBR maximale permise dans les enrobés bitumineux	
	Matériaux de couche de base	Matériaux de couche de surface
MTMD	20 %	20 % ou 10 % si couche de surface d'autoroute
Ville de Montréal	20 % ou plus si projet pilote avec demande d'évaluation pour approbation préalable	20 % ou 10 % si circulation de camions et/ou bus permise en tout temps
Ville de Québec	20 %	
Laval	20 %	
Gatineau	20 %	
Drummondville	20 % sauf si indication contraire en rapport avec la circulation (débit journalier moyen annuel : DJMA)	
Ville de Saguenay	20 %	10 %
Trois-Rivières	MTMD* avec imposition d'enregistrement informatique officiel des quantités de GBR dans la composition du mélange par le système de contrôle de la centrale d'enrobage	
Brossard	MTMD*	
Terrebonne	MTMD*	
Sherbrooke	MTMD*	
Longueuil	Interdit (0 %)	
Lévis	Interdit (0 %)	
* Le donneur d'ouvrage adopte les recommandations du Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD).		

4. Le cas d'étude du Chemin du Lac Bleu à Saint-Hippolyte

Pour ce projet, le cas d'étude ciblé était une section du Chemin du Lac Bleu à Saint-Hippolyte. Le tronçon à l'étude est d'une longueur de 400 mètres et la technique de réhabilitation sélectionnée était du type pulvérisation. La nouvelle chaussée obtenue suivant la pulvérisation était la suivante : 1) couche de surface composée d'un enrobé à fort taux de GBR, 2) couche de base composée d'un enrobé de type GB-20, 3) nouvelle fondation pulvérisée et, 4) existante. La route existante présentait de nombreux défauts de surface tel que fissuration longitudinale, fissuration en lézarde et arrachement. La Figure 1 présente quelques photos du chantier à l'étude.



Figure 1. État général du chantier à l'étude avant les travaux de réhabilitation

5. Résultats du projet

5.1. CARACTÉRISATION PRÉPARATOIRE DU « CHANTIER »

La phase initiale de caractérisation préliminaire a été menée le 8 mai 2023. Les premières étapes ont été la localisation des chaînages, des puits d'exploration, ainsi que des essais de pénétromètre dynamique (DCP) à effectuer. La Figure 2 illustre de manière schématique la section soumise à l'étude composée d'une voie par direction.

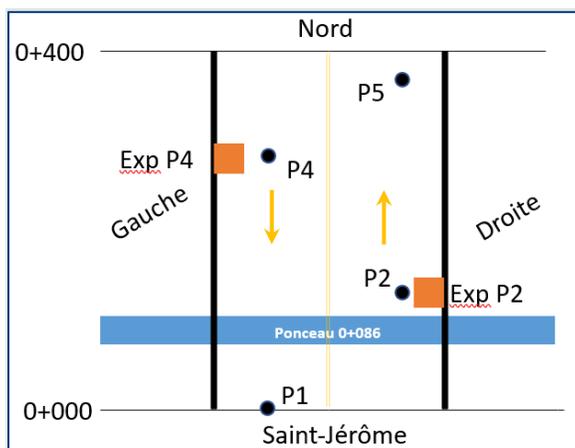


Figure 2. Localisation des points soumis aux essais

Un ponceau traversant sous la route a été repéré au chaînage 0+086 m. Quatre essais DCP ont été effectués, deux du côté droit et deux du côté gauche de la route, identifiés respectivement P1, P2, P4 et P5. Deux puits d'exploration (Exp) ont été faits pour analyser la composition de la structure et procéder à l'échantillonnage de la couche granulaire sous les revêtements bitumineux, identifiés comme ExpP1 et ExpP2. La Figure 3 illustre la prise de mesure lors de la réalisation de ces puits d'exploration et le profil de la chaussée à ces endroits.

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

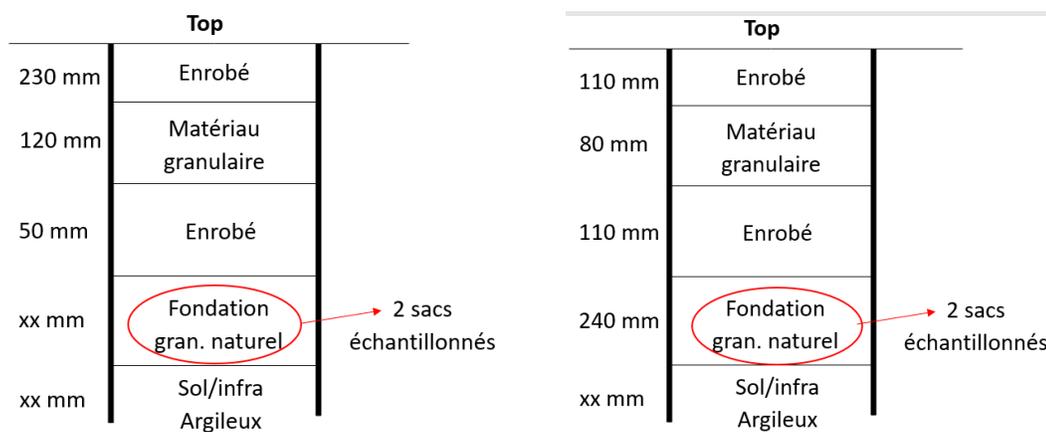


Figure 3. Prise de mesure (en haut) et profil de la chaussée (en bas) pour les puits d'exploration ExpP2 (gauche) et ExpP4 (droite)

Les puits d'exploration ont révélé la présence d'une couche de matériau granulaire entre deux couches d'enrobé bitumineux, suggérant probablement une intervention antérieure de réhabilitation visant à niveler la structure avant l'application d'une nouvelle couche d'enrobé. En ce qui concerne le puit ExpP2, la fouille n'a pas atteint le niveau du sol d'infrastructure, mais les observations de la fouille au ExpP4 suggère une composition argileuse. Deux échantillons d'environ 20 kg chacun ont été prélevés de la fondation granulaire composée de granulat naturel en vue de réaliser les essais de caractérisation en laboratoire.

5.2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE RÉALISÉS SUR LES ÉCHANTILLONS

Les essais réalisés en laboratoire sur les échantillons sont la granulométrie (méthode d'essai LC 21-040), la teneur en eau (méthode d'essai LC 21-201) et l'indice portant californien ou CBR (norme ASTM D1883). La Figure 4 présente la granulométrie des deux échantillons.

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

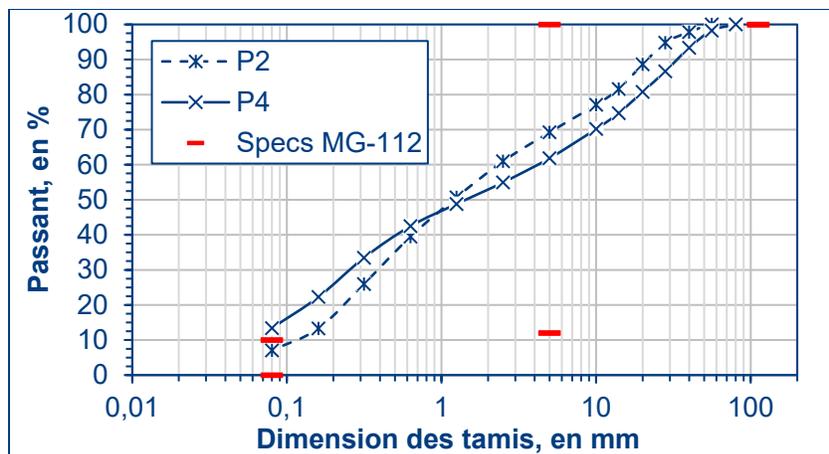


Figure 4. Granulométrie des matériaux granulaires prélevés aux points ExpP2 et ExpP4

Le matériau de fondation existant s'apparente à un matériau de type MG-112 (0-112 mm). Par contre, le pourcentage passant au tamis de 80 µm pour l'échantillon provenant de ExpP4 est trop élevé et ne respecte pas les spécifications du MTMD. L'écart maximal entre les deux échantillons est observé au tamis de 160 µm et est de 9 % et l'écart moyen est de 5 %. La teneur en eau à la réception de l'échantillon ExpP2 montre 4,2 %, tandis que celle de l'échantillon ExpP4 atteint 8,0 %.

L'essai CBR s'est réalisé en laboratoire et conformément à la méthode, soit en utilisant la compaction mécanique avec 56 coups par couche et selon 5 couches pour la fabrication des éprouvettes. Deux répétitions ont été réalisées pour chaque essai. Les échantillons ont été compactés à une teneur en eau équivalente à celle mesurée à leur réception. La masse volumique moyenne (ρ_d) après la compaction est de 2 125 kg/m³ pour les éprouvettes ExpP2 et 2 167 kg/m³ pour les éprouvettes ExpP4. Les éprouvettes non saturées ont été soumises à l'essai directement après la compaction. Pour la saturation des éprouvettes, une surcharge de 4,54 ± 0,02 kg a été appliquée à la surface et les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pour une période de 96 heures. Les essais saturés ont été réalisés immédiatement après cette période d'immersion. La Figure 5 présente les résultats des essais en laboratoire CBR.

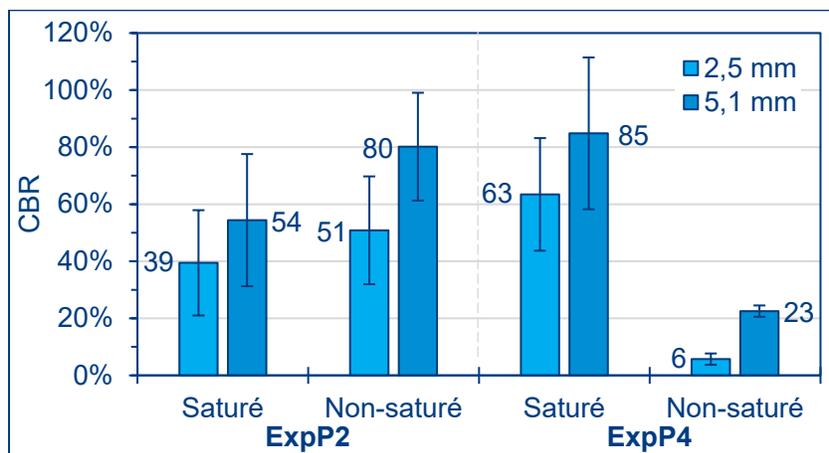


Figure 5. Résultats des essais de laboratoire CBR réalisés sur les deux échantillons prélevés

Les résultats démontrent une hétérogénéité de capacité portante entre les deux échantillons. Pour la condition non saturée, l'échantillon provenant du puit Exp2 présente une résistance plus élevée de 45 et 57 % respectivement aux deux profondeurs d'essai (2,5 et 5,1 mm) par rapport aux résultats

obtenus pour Exp4. L'inverse est observé pour les échantillons saturés où ExpP2 présente une valeur de CBR plus basse de 24 et 31 % aux deux profondeurs comparativement à ExpP4.

5.3. RÉSULTATS DES ESSAIS DE CHANTIER

Les essais DCP ont été réalisés en chantier et conformément à la norme ASTM D6951. Une profondeur d'essai de 500 mm a été ciblée pour les quatre essais (1 essai/point : P1, P2, P4 et P5). Les résultats DCP sont présentés à la Figure 6 et les moyennes des mesures par tranche de 100 mm sont reportées au Tableau 2.

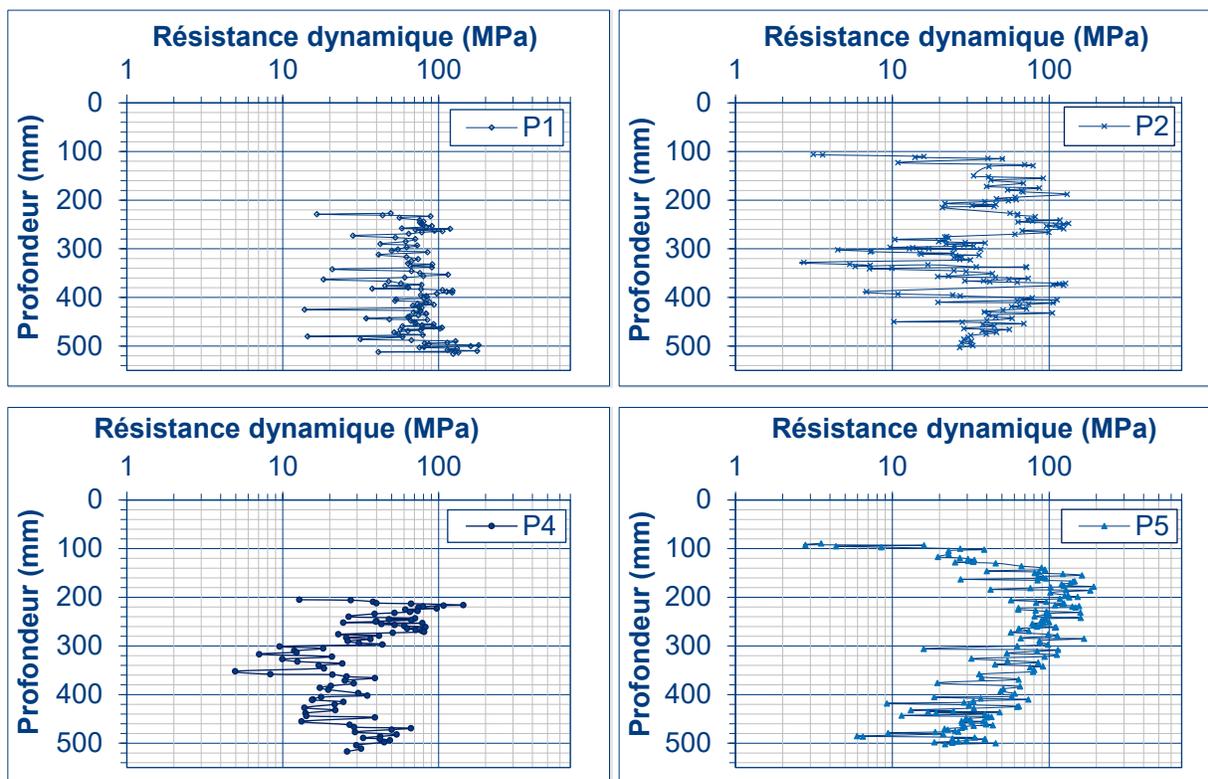


Figure 6. Résultats DCP obtenus en chantier avant les travaux de réhabilitation

Tableau 2. Résultats DCP obtenus en chantier (moyenne à chaque tranche de 100mm)

Profondeur de pénétration (mm)	Résistance dynamique (MPa)			
	Localisation des essais*			
	P1	P2	P4	P5
0 - 100	---	---	---	7
100 - 200	---	51	---	85
200 - 300	69	55	56	87
300 - 400	72	35	18	63
400 - 500	74	50	31	31

* Essais réalisés sur la chaussée avant décohésionnement et après le forage de la couche d'enrobé.

Les résultats DCP démontrent encore une fois l'hétérogénéité au sein de la structure de la chaussée. De façon globale, les résultats obtenus aux points P1 et P5 présentent des valeurs plus hautes que

les points P2 et P4. P4 présente la valeur moyenne (0 à 500 mm) la plus faible avec 35 MPa et P1 la plus élevée avec 72 MPa. Il est à noter que la profondeur de forage avant l'essai varie d'un point à l'autre et dépend de l'épaisseur des couches d'enrobé.

5.4. Caractérisation de l'enrobé en laboratoire pour les phases « formulations » et « production »

Les composants de l'enrobé en phase « formulation » a été fourni par le Groupe Conseil SCT Inc. qui ont été prélevés chez l'entrepreneur LEGD. L'enrobé sous étude est un enrobé de surface de type ESG-10 avec une teneur en GBR de 30 %. Le bitume d'apport (ou d'ajout) est un bitume PG 58H-34 HRD (haute résistance au désenrobage). Les granulats, le GBR et le bitume ont été malaxés au LCMB avec un malaxeur thermorégulé à une température de 165 °C. Les essais réalisés sur l'enrobé sont la résistance à la déformation permanente (ou à l'orniérage) à 60°C (méthode d'essai LC 26-410), la tenue à l'eau (ou *Tensile Strength Ratio* (TSR) (norme AASHTO T283) et la détermination de la résistance au retrait thermique empêché ou *Thermal Stress Restrained Specimen Test* (TSRST) (norme AASHTO TP10-93). Aucune période de cure n'a été appliquée pour l'enrobé destiné à l'essai d'orniérage et une cure de deux heures à 150 °C a été appliquée sur l'enrobé destiné au retrait thermique. La période de cure permet de simuler l'oxydation du bitume au sein de l'enrobé lors de la production à l'usine. Les éprouvettes pour la tenue à l'eau ont été fournies par le Groupe Conseil SCT Inc.

Lors de la phase production de l'enrobé, 16 boîtes ont été échantillonnées à différents moments de la production (quatre boîtes à chaque tranche de 50 tonnes produites). L'usine est de type continu avec un brûleur à contre-courant dans le tambour sécheur et l'introduction du GBR s'est effectuée avec un anneau de recyclage. Ici, le bitume d'apport est un bitume PG 58H-34 THRD (très haute résistance au désenrobage). La production de l'enrobé a débuté à 6h00 et le dernier échantillonnage a eu lieu à 7h15. La température de l'enrobé à l'échantillonnage était de 167 °C pour toutes les mesures. Les boîtes ont été recombinaées en laboratoire suivant la méthode d'essai LC 26-010 en recombinaant 1/16^{ième} de chaque boîte pour obtenir un échantillon homogène. Un premier essai de détermination de la densité maximale (méthode d'essai LC 26-045) a été effectué pour établir les masses nécessaires à la compaction des éprouvettes. Une valeur moyenne de 2,605 a été obtenue, ce qui représente un écart élevé par rapport à l'enrobé en phase de formulation. Toutes les éprouvettes ont été compactées à 150 °C en laboratoire sans y effectuer une période de cure, afin de limiter l'oxydation de l'enrobé à celle provoquée par le malaxage en centrale. Les essais de caractérisation de l'enrobé ont été réalisés avec les mêmes conditions précisées précédemment.

Les résultats des essais des 2 phases, formulation et chantier, sont présentés au Tableau 3. Des précisions supplémentaires sur ces résultats d'essais sont présentées en annexe.

L'enrobé en phase de formulation présente une bonne résistance à l'orniérage, conforme aux exigences du devis, avec une profondeur d'orniérage inférieure à 15,0 % après 30 000 cycles. L'enrobé produit en usine démontre une résistance à l'orniérage encore plus élevée par rapport à celui testé lors de la formulation. En accord avec les spécifications du devis, la profondeur d'orniérage reste inférieure à 15,0 % après 30 000 cycles.

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

Tableau 3. Résultats obtenus en laboratoire en phase formulation et chantier

Essai	Caractéristique évaluée	Méthode ou norme	Résultats		Spécifications dans le devis
			Phase Formulation	Phase Chantier	
Orniérage	Déformation permanente à 30 000 cycles et à 60 °C	LC 26-410	9,9	8,1	≤ 15
TSRST	Fissuration thermique	AASHTO TP10-93	-34,6	-32,5	≤ -34,0
TSR	Tenue à l'eau	AASHTO T283	76,4	89,5	≥ 85,0

Les résultats des essais TSRST indiquent que l'enrobé en phase de formulation se situe à la limite spécifiée dans le devis ($\leq -34,0$ °C), avec une température de rupture moyenne de $-34,6$ °C et une contrainte moyenne maximale de 3 315 kPa. Cependant, l'enrobé produit en usine (en phase chantier) ne satisfait pas la limite spécifiée, avec une température de rupture moyenne plus élevée de $-32,5$ °C, indiquant une performance moindre par rapport à l'enrobé formulé. La contrainte moyenne maximale reste similaire à celle de l'enrobé formulé, s'élevant à 3 347 kPa. Il est important de noter que le matériau fabriqué en usine demeure non conforme aux spécifications du devis. Les résultats obtenus à l'orniérage et au TSRST semblent démontrer une oxydation plus importante lors de la production en usine que celle simulée en laboratoire.

Les résultats de l'essai de tenue à l'eau (TSR de 76,4 %) pour l'enrobé en phase de formulation ne respectent pas les spécifications du devis (TSR $\geq 85,0$ %), ce qui le rend non conforme. La contrainte moyenne des éprouvettes testées en condition sèche s'élève à 757,6 kPa, tandis qu'elle est de 578,8 kPa en condition saturée dans l'eau (TSR = Saturée/Sèche x 100). En revanche, l'enrobé fabriqué en usine présente une résistance à l'eau supérieure à celui formulé, avec un TSR de 89,4 %, se conformant ainsi aux spécifications du devis. La valeur moyenne des contraintes pour les éprouvettes en condition sèche est de 925,0 kPa, et est de 827,7 kPa en condition saturée dans l'eau.

En résumé, l'enrobé en phase de formulation est non conforme en raison des résultats de l'essai TSR, tandis que l'enrobé en phase chantier est non conforme en raison des résultats de l'essai TSRST.

5.5. MISE EN PLACE DE L'ENROBÉ AU « CHANTIER »

La mise en place de l'enrobé bitumineux (EB) à fort taux (30 %) de GBR s'est effectuée le 15 septembre dernier à partir de 7h45 entre le # civique 308 et la 51^e avenue, soit dans la dernière portion des travaux à réaliser sur le chemin du Lac Bleu pour l'année 2023. Malheureusement, cette portion de chaussée se trouvait à l'opposé de la section qui avait été au préalable caractérisée (Section 4.1).

Pour débiter, à partir de la 51^e avenue jusqu'au # civique 362 et pour les deux directions, une couche de correction composé d'EB30% a été mise en place afin de combler les faibles ornières présentes.

Ensuite, la mise en place de la couche de surface d'EB30% a débutée dans la voie direction Nord-Est : # civiques impairs. Aussi, la température à la surface de la couche (T_{surf}) était assez faible : 90 à 126 °C. Il faut mentionner que la paveuse est froide au début des travaux, ce qui génère un refroidissement de l'EB30%. Aussi, la mise en place d'une couche de correction et l'attente des camions avant la mise en place de la couche de surface a pu générer un refroidissement de l'EB30%. Ensuite, suivant la poursuite des opérations de mise en place, la T_{surf} a augmenté pour atteindre 138-139 °C du chaînage 1+125 jusqu'au # civique 352. Notamment, la température à la vis de la paveuse (T_{vis}) était de 154 °C à 9h17, soit à mi-section. À titre informatif, la température de malaxage de l'EB était de 166-168 °C (Section 4.2). À la hauteur de la 50^e avenue, il y avait une déchirure de la couche qui a été corrigée par la suite selon le surveillant de la Municipalité (M. Daniel Leblanc).

La mise en place de l'EB dans cette voie s'est terminée près du # civique 308 à 9h45. Toutefois, le compactage de cette couche s'est poursuivi pour environ 20-30 minutes.

Par ailleurs, l'épaisseur spécifiée par la Municipalité et ciblée par l'entrepreneur était de 30 mm pour cette couche de surface. Il faut mentionner que l'épaisseur spécifiée par la Municipalité est nettement inférieure à celle spécifiée par le MTMD et le CERIU (Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines) qui est de 40 mm. Cet élément important a été mentionné à M. Mathieu Meunier de la Municipalité qui mentionne qu'il n'y a pas eu de problème de compaction jusqu'à présent, malgré cette faible épaisseur.

Pour terminer, M. Daniel Leblanc de la Municipalité a obtenu des taux de compaction variant de 86-87 à 93 % (en considérant une masse volumique de 2 545 kg/m³ : valeur obtenue par le Groupe Conseil SCT Inc. lors de la phase formulation²) avec son appareil PQI 380 pour cette voie (direction Nord-Est). La faible épaisseur de la couche jumelée à une faible température de la couche d'EB30% et la présence d'un pneumatique (créant une surface plus ou moins plane) peuvent expliquer ces faibles taux de compaction (< 93 %). Toutefois, M. Daniel Leblanc m'a mentionné que les taux de compaction étaient supérieurs à 93 % dans l'autre voie (direction Sud-Ouest).

6. Discussion et apprentissage

6.1. Performances mécaniques des enrobés avec fort taux de GBR

L'impact de l'ajout de GBR à fort taux (30 % et plus) est bien documenté dans la littérature scientifique. De manière générale, l'ajout de GBR améliore les performances à haute température, notamment la résistance à l'orniérage des EB. En revanche, l'ajout de GBR a pour effet de diminuer la résistance à la fissuration thermique et la tenue à l'eau. Dans cette optique, les essais de performance prévus dans ce projet ont été planifiés afin de vérifier ces dites performances. À titre de rappel, les trois (3) essais de performances prévus étaient : 1) résistance à l'orniérage, 2) résistance à la fissuration thermique, et 3) tenue à l'eau.

L'essai de résistance à l'orniérage vise à évaluer la résistance aux déformations permanentes, ce qui survient principalement à haute température (Figure 7). L'essai en laboratoire s'est fait à une température de 60 °C. Ce qui ressort de l'analyse des résultats d'essais de résistance à l'orniérage réalisés sur l'enrobé fabriqué en laboratoire et l'enrobé fabriqué en usine est qu'il ne s'agit pas d'un facteur problématique pour les enrobés à fort taux de GBR. En effet, les résultats obtenus montrent de très bonnes performances vis-à-vis de la résistance à l'orniérage. L'enrobé fabriqué en usine présente une résistance à l'orniérage supérieure à l'enrobé formulé en laboratoire (profondeur d'ornières de 8,1 % vs 9,9 %). Les résultats sont tous conformes à ce qui était prescrit au devis (maximum 15 % d'orniérage à 30 000 cycles de sollicitation).

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

² Toutefois, en considérant une valeur de 2 597 kg/m³ (d_{mm} obtenue par le LCMB en phase production x 997,044 kg/m³ qui est la masse volumique de l'eau à 25 °C), les taux de compaction obtenus, à priori, seraient inférieurs de 2 % ($2\,545/2\,579 \text{ kg/m}^3 = 98 \%$).



Figure 7. Appareil de mesure de la résistance à l'orniérage utilisé (orniéreur MLPC + enceinte de chauffage)

En ce qui concerne la résistance à la fissuration thermique, cette propriété a été évaluée par l'essai de retrait thermique empêché (TSRST). L'essai consiste à refroidir une éprouvette d'enrobé tout en maintenant sa longueur constante. Comme le retrait de l'éprouvette est empêché, des contraintes de traction se développent au sein du matériau. La rupture se produit lorsque les contraintes de traction dépassent la résistance en traction de l'enrobé (Figure 8). Le paramètre le plus utilisé pour apprécier les résultats de l'essai est la température de rupture. Lorsque du GBR est incorporé dans les enrobés, le « vieux bitume » du GBR se mélange avec le nouveau bitume d'ajout. Le bitume du GBR étant oxydé (suivant l'exposition aux rayons UV et le vieillissement en place), les propriétés du mélange de bitume GBR et du bitume d'ajout sont modifiées par rapport aux propriétés du bitume d'ajout. L'oxydation du bitume a pour effet de diminuer la résistance à la traction de ce dernier.

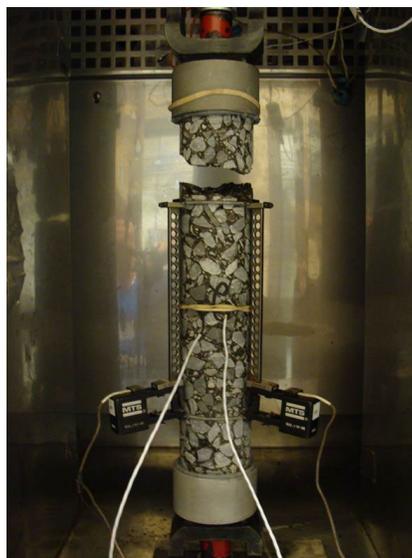


Figure 8. Appareil utilisé pour la mesure du retrait thermique empêché et éprouvette suivant la réalisation de l'essai

Dans le cas des essais de *TSRST*, on constate une importante différence entre les résultats pour l'enrobé fabriqué en laboratoire ($T_{\text{rupture}} = -34,6^{\circ}\text{C}$) et l'enrobé fabriqué en usine ($T_{\text{rupture}} = -32,5^{\circ}\text{C}$). À titre de rappel, l'exigence de retrait thermique au devis était une température de rupture inférieure ou égale à $-34,0^{\circ}\text{C}$. Ainsi, l'enrobé fabriqué en laboratoire était conforme aux exigences, mais l'enrobé fabriqué en usine s'avère non conforme à l'exigence du devis. Une raison potentielle pour expliquer cet écart de température de rupture est le fait que l'enrobé en usine peut avoir subi un plus important vieillissement à court terme, causé par les opérations de chauffage et malaxage des matériaux, de même que le transport et la mise en place en chantier. Toutefois, il est peu probable qu'un tel écart de résultat soit causé uniquement par ce vieillissement à court terme. À la lumière des informations disponibles, il n'est pas possible de conclure sur la cause exacte de cet écart. Par contre, il convient de souligner que pour l'enrobé fabriqué en laboratoire (phase formulation), la température de rupture était très près de l'exigence. **Ainsi, il appert que dans le cas de la formulation d'enrobé à fort taux de GBR, il est risqué de formuler des enrobés qui présente des températures de rupture près de l'exigence.** Il serait préférable de se laisser une marge de manœuvre pour compenser les effets du vieillissement potentiel et tout autre phénomène ayant pour effet de réduire la résistance à la fissuration thermique pouvant se produire.

Le dernier essai de performance qui était prévu au devis était l'essai de tenue à l'eau (*TSR*). Les enrobés sont des matériaux sensibles à l'eau, avec le temps, l'eau peut pénétrer à travers le film de bitume et atteindre l'interface bitume-granat, les conditions sont alors réunies pour que l'eau chasse le bitume de la surface du granulat. Le désenrobage se traduit en une diminution des propriétés mécaniques de l'enrobé. L'utilisation de GBR peut avoir un effet positif ou négatif vis-à-vis du potentiel de désenrobage, en fonction de la viscosité, du type de bitume et de sa composition chimique. L'essai de tenue à l'eau utilisé dans ce projet consiste à comparer les résultats de résistance à la traction indirecte de deux séries d'éprouvettes, une série d'éprouvettes ne subit aucun conditionnement préalable (sec), tandis que l'autre série subit un cycle de gel-dégel et un trempage dans l'eau chaude (saturé) (Figure 9). Le ratio entre les moyennes des deux séries de résultats exprimés en termes de Tensile Strength *Ratio* (*TSR*) et permet d'apprécier la tenue à l'eau et la résistance au désenrobage.



Figure 9. Essai de résistance à la traction indirecte pour la mesure de la tenue à l'eau

Dans le cadre du projet, les résultats du projet sont surprenants. En effet, les résultats de l'essai de tenue à l'eau en phase de formulation (enrobé fabriqué en laboratoire) sont inférieurs aux résultats de l'essai en phase chantier (enrobé fabriqué en usine). La valeur de *TSR* pour l'enrobé fabriqué en

laboratoire était de 76,4 %, ce qui était inférieur aux exigences du devis (supérieur ou égale à 85,0 %). La valeur de TSR pour l'enrobé fabriqué en usine était jugée excellente, soit de 89,5 %. La décision de procéder à la réalisation du chantier avec cet enrobé avait été prise par le donneur d'ouvrage, car dans le cas contraire, il aurait été nécessaire de retourner en phase de formulation, ce que les délais de réalisation du projet ne permettaient pas de faire. En date d'aujourd'hui et à la lumière des informations disponibles, il est impossible d'expliquer cet grand écart.

Toutefois, **cette observation permet de mettre en lumière l'importance de poursuivre les recherches relativement à l'impact du GBR sur les propriétés liées à la résistance au désenrobage, la tenue à l'eau et la résistance au gel-dégel.** Ces aspects seront d'ailleurs couverts dans un projet qui sera lancé au courant du printemps 2024 au LCMB.

6.2. INTÉGRATION DU PROJET PILOTE ET DES CLAUSES DE PERFORMANCES DANS LE DEVIS

L'approche utilisée à l'heure actuelle dans l'industrie est majoritairement de type « normative ». Selon la norme CSA A23.1, la spécification normative est une façon de spécifier un matériau selon laquelle les procédés, les constituants, les dosages et les méthodes employés pour obtenir le résultat souhaité sont spécifiés dans des termes normatifs, spécifiés au cahier des charges. L'approche dite « performancielle » vise à prescrire des matériaux qui répondent à des critères de performance plutôt que des exigences liées à la composition des matériaux. Le recours aux critères de performance permet de favoriser l'innovation, l'obtention de matériaux durables et performants.

Dans le cas présent, l'équipe de recherche de l'ÉTS s'est intégrée au projet dès le début de la conception de ce dernier. En effet, l'ÉTS a apporté un support tant au niveau de la préparation des documents d'appels d'offres qu'au niveau des étapes préparatoires de la réalisation du chantier. De plus, l'entrepreneur sélectionné suivant le processus d'appels d'offres conventionnel (principe du plus bas soumissionnaire conforme) n'avait pas l'habitude de collaborer avec une équipe universitaire de recherche dans le cadre de ses activités courantes. Ainsi, dès le début du projet, des enjeux d'interprétation des clauses incluses au devis se sont présentés, plus particulièrement au niveau de la clause 4.1.2.9 (Figure 10). En effet, la compréhension de certains acteurs par rapport au rôle de l'équipe de recherche était bien différente du rôle anticipé pour l'ÉTS. Le rôle attendu par les acteurs était que l'équipe de l'ÉTS s'occuperait de la formulation des matériaux et de l'acceptation de ceux-ci, alors que le rôle de l'équipe de l'ÉTS identifié dès le début du projet était simplement de faire figure de laboratoire externe et que l'acceptation des matériaux revenait au client. **À l'avenir, le rôle de l'équipe de recherche dans les projets pilotes devra clairement être défini dans les documents d'appels d'offres pour éviter la confusion.** La mention de projet pilote dans les documents d'appels d'offres peut porter à confusion.

4.1.2.9 Projet de recherche et développement (R&D)

La Municipalité souhaite réaliser un projet de recherche et développement (R&D) sur le chemin du Lac-Bleu en collaboration avec l'École de technologie supérieure (ÉTS). À l'endroit sélectionné, l'adjudicataire devra fournir et mettre en place un enrobé bitumineux utilisé en couche de surface et contenant de 25 à 30 % de granulats bitumineux récupérés (GBR). Des détails supplémentaires concernant la fourniture et la mise en place de cet enrobé à fort taux de GBR sont présentés à la section 4.7.4.4. L'adjudicataire devra offrir une pleine collaboration avec la Municipalité et l'équipe de l'ÉTS lors de la réalisation des travaux.

Figure 10. Extrait de la clause 4.1.2.9 ayant été intégrée au devis

Par ailleurs, dans le cadre de ce projet, la prescription des exigences à obtenir au niveau de l'enrobé avec fort taux de GBR s'était faite selon une approche de type performance (Figure 11). Les exigences

à rencontrer étaient clairement identifiées, l'identification des exigences ciblée par l'équipe du projet s'était fait sur la base d'une analyse des projets comparables. Les essais de résistance à l'orniérage et d'aptitude au compactage sont très répandus dans l'industrie. La majorité des laboratoires de contrôle de la qualité des matériaux sont en mesure d'effectuer l'essai d'aptitude au compactage. Or, pour l'essai de résistance à l'orniérage, seuls le Ministère des Transports et Mobilité Durable (MTMD) et l'ÉTS possèdent cet appareil et sont en mesure de réaliser des essais pour les différents acteurs de l'industrie. En ce qui concerne l'essai de résistance au retrait thermique empêché, il y a seulement l'ÉTS qui est en mesure de faire cet essai pour le moment. Pour l'essai de tenue à l'eau TSR, la majorité des laboratoires possèdent l'équipement pour réaliser cet essai, mais son utilisation est encore peu répandue dans l'industrie.

Dans le cadre du présent projet, l'entrepreneur a eu recours à un laboratoire de contrôle de la qualité pour formuler ces matériaux. De plus, cet entrepreneur n'était pas familier avec l'essai de résistance au retrait thermique et l'essai de tenue à l'eau. Une mauvaise compréhension du processus de vérification des résultats de la formule de mélange produite en laboratoire s'est traduite par le fait que la réalisation des essais a été retardée dans le temps. Ainsi, il ressort de ce projet l'apprentissage suivant : **les essais et critères de performance relatifs aux enrobés sont encore méconnus dans l'industrie, ce qui limite le déploiement à grande échelle.** Un besoin d'éducation a ainsi été identifié.

Essai	Méthode d'essai	Exigences		
Résistance au retrait thermique empêché	AASHTO TP10-93	< ou = -34,0 °C		
Résistance à l'orniérage sur plaques de 50 mm, 60 °C, 30 000 cycles	LC 26-410	< ou = 15 %		
Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire	LC26-003	10 girations	80 girations	200 girations
		> ou = 11,0 %	4,0 – 7,0 %	> ou = 2,0 %
Tenue à l'eau (TSR)	AASHTO T283	> ou = 85,0 %		

Figure 11. Extrait du Tableau II intégré dans le devis du projet pour détailler les exigences de performances

6.3. Contexte particulier de l'industrie québécoise des enrobés bitumineux

L'intégration d'une équipe de recherche universitaire dans un projet de réhabilitation routière s'est traduite par des difficultés de coordination. Il faut savoir que l'équipe de recherche de ce projet compte à son actif la réalisation de nombreux projets pilotes en chantier et possède une forte expertise en la matière. Ces chantiers se font de manière générale avec quelques collaborateurs qui sont habitués de travailler avec l'équipe de l'ÉTS. De plus, la grande majorité des projets pilotes réalisés l'ont été dans des contextes privés, ou bien dans un contexte où l'équipe de recherche de l'ÉTS intervenait simplement pour échantillonner des matériaux.

Pour qu'un projet pilote en chantier soit un succès, la communication entre les différents acteurs est un élément clé. À quelques reprises, certaines décisions liées à la réalisation du chantier ont été prises

sans que l'équipe de l'ÉTS soit mise au courant. Également, comme l'équipe de l'ÉTS s'est intégrée au projet dès le début, soit en phase de préparation des documents d'appels d'offres, cela a eu pour effet de créer plusieurs problématiques :

- Délais supplémentaires liés à la formulation de l'enrobé causé par le manque d'expérience avec la formulation des enrobés à fort taux de GBR. L'entrepreneur et le laboratoire ont dû faire appel à l'équipe de l'ÉTS à quelques reprises pour assistance technique.
- Problème logistique en chantier se traduisant par l'impossibilité de construire une section de type « référence » pour comparer les performances futures entre l'enrobé à fort taux et l'enrobé conventionnel. Ainsi, dans les prochaines années lorsqu'il y aura suivi des performances de la section d'essai avec enrobé à fort taux, il ne sera pas possible de comparer avec les performances d'une section dite de référence.

À l'avenir, une réunion de démarrage et des réunions régulières de suivi avec tous les intervenants devront être organisées et exigées. Également, le donneur d'ouvrage doit faire preuve de leadership dans la réalisation du projet et chapeauter toutes les étapes. Cette responsabilité de leadership ne peut revenir à l'équipe de l'ÉTS, considérant les liens contractuels entre les différents intervenants impliqués dans un projet de construction.

Comme il a été montré dans les sections précédentes, d'importantes différences ont été observées quant aux performances de l'enrobé fabriqué en laboratoire et l'enrobé fabriqué en usine. En date d'aujourd'hui et à la lumière des informations disponibles, il n'est pas possible d'expliquer ces écarts. L'un des éléments clés pour l'augmentation des taux de GBR incorporés dans les enrobés demeure la vérification du dosage réel en GBR de l'enrobé. **À cet effet, l'un des apprentissages du projet est le fait qu'il serait important à l'avenir de se doter de moyen pour vérifier le taux réel de GBR.** Dans la revue des pratiques actuelles d'utilisation du GBR au Québec (Section 2.2), une pratique intéressante qui semble être adoptée à la Ville de Trois-Rivières a été constatée. Il s'agit de demander aux entrepreneurs, dans les devis techniques, de fournir les enregistrements du dosage des mélanges d'enrobé en spécifiant certaines particularités propres aux GBR (Figure 12). Ce genre de clause contractuelle permet effectivement de vérifier le taux réel de GBR incorporé à l'enrobé.

(le reste de cette page a été laissé en blanc de façon intentionnelle)

ARTICLE 18	<p>ENREGISTREMENT DU DOSAGE DES MÉLANGES D'ENROBÉ</p> <p>Un enregistrement informatique officiel des constituants entrant dans la composition des enrobés doit être acquis par le système de contrôle de la centrale. Les quantités de bitume et de granulats bitumineux récupérés (GBR) incorporés au mélange doivent être enregistrées séparément de tous les autres constituants. Pour être autorisé à utiliser du GBR dans sa production, l'entrepreneur doit remettre au surveillant, avant le début des travaux, un exemple des enregistrements de sa centrale qui démontre le respect des exigences.</p> <p>Pour les centrales à gâcher, le système de contrôle de la centrale doit conserver l'enregistrement de la pesée des granulats aux bennes chaudes, de la pesée indépendante du GBR et de celle du bitume vierge ajouté. Pour les centrales continues, un enregistrement effectué toutes les cinq minutes ou moins doit être conservé pour chacune des bennes froides, dont celle du GBR.</p> <p>L'entrepreneur doit conserver les enregistrements du dosage des enrobés sur support informatique pendant une période d'un an. Ces enregistrements doivent être fournis sur demande du surveillant pour une journée de production à l'intérieur d'un délai de 24 heures. À défaut de transmettre les documents dans le délai prescrit, une retenue permanente de 200 \$ (avant taxes) par jour ouvrable est appliquée à titre de dommages-intérêts liquidés pour chaque document non reçu.</p>
-------------------	--

Figure 12. Extrait d'un devis technique de la Ville de Trois-Rivières (tiré des documents disponibles sur le site web seo.ca)

7. Conclusion et éléments à considérer

Les observations et les enseignements tirés de l'étude de cas indiquent clairement qu'il faut travailler les aspects suivants pour réussir la généralisation de l'utilisation de GBR dans les travaux routiers municipaux au Québec :

- **Poursuivre les recherches** quant à l'impact du GBR sur les propriétés liées à la résistance au désenrobage, la tenue à l'eau et la résistance au gel-dégel;
- **Développer une stratégie de formation** pour faire monter en compétence l'industrie au niveau de : 1) la préparation de documents d'appels d'offres incluant des essais de performance 2) les essais de performance disponible pour les enrobés avec GBR, 3) la formulation d'enrobé à fort taux de GBR;
- **Proposer des taux d'incorporation de GBR standards** pour les matériaux de chaussée à utiliser dans des projets routiers gérés par les municipalités au Québec afin d'éviter la confusion entre les différents donneurs d'ouvrages;
- **Établir une procédure standard de vérification et de validation technique des matériaux** et de leur mise en œuvre dans le cadre d'un projet routier pilote incluant au moins 30 % de GBR. Cette procédure inclut non seulement la vérification des performances de l'enrobé, mais également la vérification du dosage réel de GBR.

8. Références

- [1] G. Tarsi, P. Tataranni, et C. Sangiorgi, « The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review », *Materials*, vol. 13, n° 18, p. 4052, sept. 2020, doi: 10.3390/ma13184052.
- [2] S. Gulzar *et al.*, « Towards sustainable roads: A State-of-the-art review on the use of recycling agents in recycled asphalt mixtures », *J. Clean. Prod.*, vol. 406, p. 136994, juin 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136994.
- [3] EAPA, « Asphalt in figures », European Asphalt Pavement Association, 2021.
- [4] A. Pedraza, « Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés », These de doctorat, Lyon, 2018. Consulté le: 26 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2018LYSET001>
- [5] A. Diemer, C. E. Nedelciu, M. E. Morales, C. Batisse, et C. Cantuarias-Villesuzanne, « Waste Management and Circular Economy in the French Building and Construction Sector », *Front. Sustain.*, vol. 3, 2022, Consulté le: 26 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsus.2022.840091>

Annexe : résultats détaillés de la caractérisation de l'enrobé

Caractérisation de l'enrobé en phase « formulation »

L'essai d'orniérage s'est réalisé sur des plaques de dimension de 180 x 500 x 50 mm³. Deux essais ont été réalisés simultanément. La teneur en vides moyenne des plaques était de 5,3 %. La Figure A.1 présente les profondeurs d'orniérage en fonction du nombre de cycles.

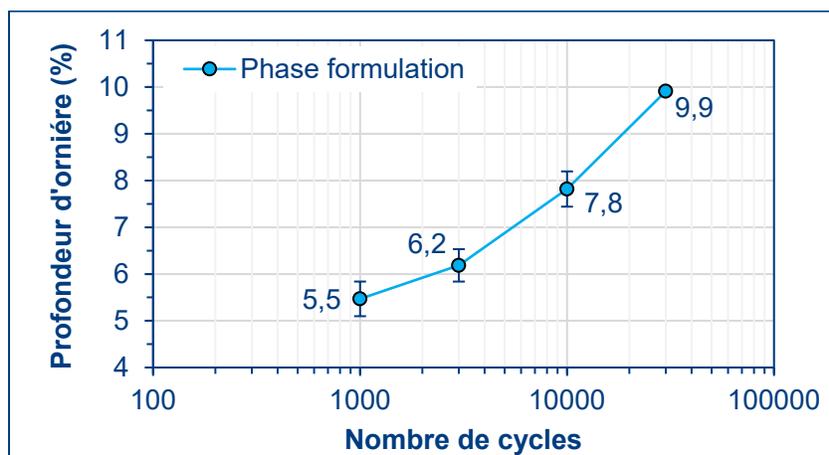


Figure A.1. Résultats détaillés de résistance à l'orniérage (phase formulation)

L'enrobé présente une excellente résistance à l'orniérage, respectant la spécification du devis. La profondeur d'orniérage demeure inférieure à 15,0 % après 30 000 cycles.

La détermination de la résistance au retrait thermique empêché s'est effectuée sur des éprouvettes cylindriques de dimension de 57,5 ± 0,5 mm de diamètre et de 220 ± 2 mm de longueur carottées dans une plaque de 180 x 500 x 100 mm³. La plaque a été conservée pendant 7 jours avant le carottage et la densité brute des éprouvettes a été mesurée aussitôt le carottage complété (masse dans l'eau et masse SSS). La masse sèche a été prise lorsqu'une masse constante entre deux pesées sur une période de 8 heures a été mesurée. La teneur en vides moyenne des éprouvettes est égale à 4,7 %. La Figure A.2 présente les résultats des essais TSRST.

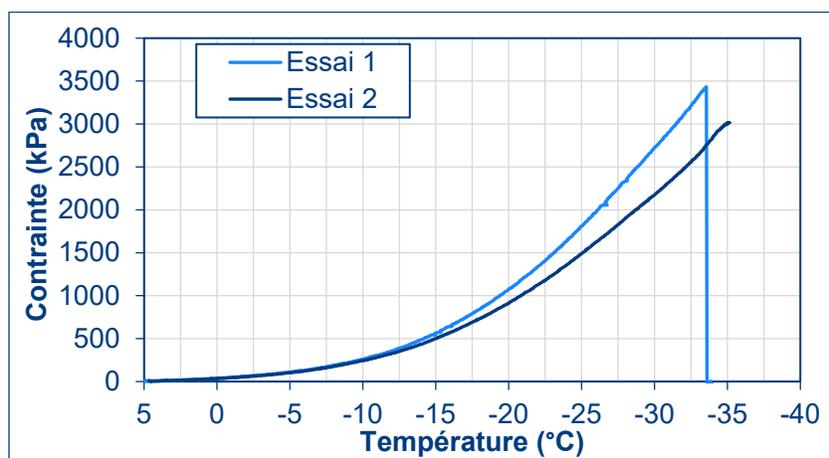


Figure A.2. Résultats détaillés de la résistance au retrait thermique empêché (phase formulation)

Les résultats d'essai démontrent que l'enrobé se retrouve à la limite de la spécification du devis ($\leq -34,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), avec une température de rupture moyenne de $-34,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La contrainte moyenne maximale est égale à 3 315 kPa. Il est à noter qu'une des éprouvettes n'a pas été prise en considération étant donnée des problèmes d'équipements lors de l'essai.

L'essai de tenue à l'eau s'est effectué avec 6 éprouvettes (3 en condition saturée et 3 en condition sèche). La teneur en vides des éprouvettes respectait celle imposée par la méthode d'essai ($7,0 \pm 0,5\%$). Les dimensions de éprouvettes cylindres sont de $100 \pm 2\text{ mm}$ de diamètre et de $67 \pm 2\text{ mm}$ de hauteur. La teneur en vides a été déterminée par pesée hydrostatique. La Figure A.3 présente les résultats de la tenue à l'eau.

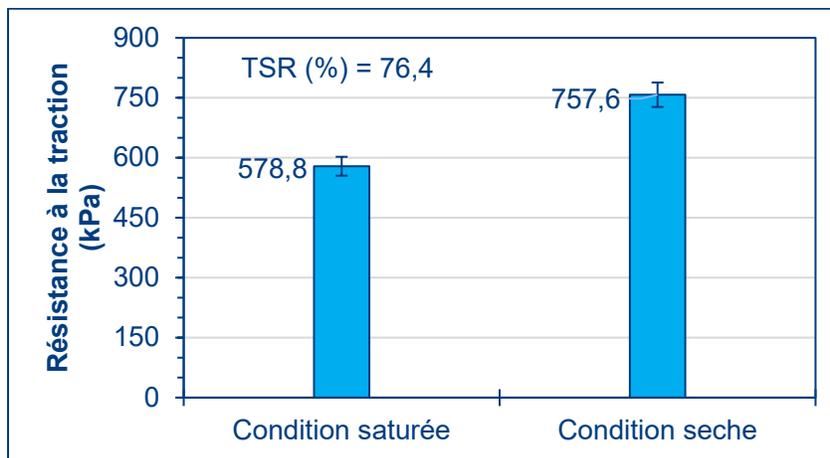


Figure A.3. Résultats détaillés de la tenue à l'eau (phase formulation)

La saturation des éprouvettes et les périodes de conditionnement ont été respectées pour toutes les éprouvettes. Cependant, les résultats de tenue à l'eau (TSR = 76,4 %) ne respectent pas les spécifications du devis (TSR $\geq 85,0\%$). Le matériau est donc non-conforme.

Caractérisation de l'enrobé en phase « chantier »

Pour l'essai d'orniérage, la teneur en vides moyenne des plaques est 7,4 %. La Figure A.4 présente les profondeurs d'orniérage au fil du nombre de cycles.

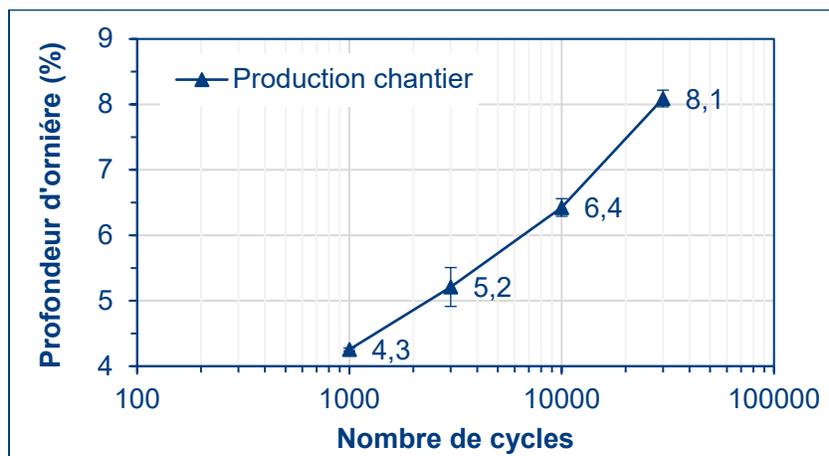


Figure A.4. Résultats détaillés de la résistance à l'orniérage (phase chantier)

L'enrobé présente une résistance à l'orniérage supérieur à celui testé en formulation. Conformément aux spécifications du devis, la profondeur d'orniérage reste inférieure à 15,0 % après 30 000 cycles.

Concernant l'essai TSRST, la teneur moyenne des vides des trois éprouvettes est 7,4 %. Les résultats de l'essai TSRST sont illustrés dans la Figure A.5. Aucun problème lié à l'équipement n'a été rencontré au cours des essais.

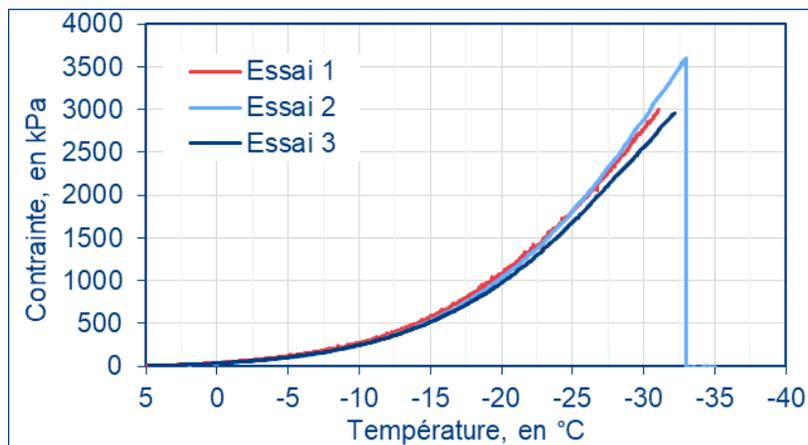


Figure A.5. Résultats détaillés de la résistance au retrait thermique (phase chantier)

Les résultats d'essai démontrent que l'enrobé ne satisfait pas la limite spécifiée dans le du devis ($\leq -34,0$ °C), avec une température de rupture moyenne de $-32,5$ °C, ce qui est plus haut (moins performant) que l'enrobé en formulation. La contrainte moyenne maximale est égale à 3 347 kPa, montant une similarité avec l'enrobé testé lors de la formulation. Toutefois, le matériau demeure non-conforme.

La compaction des éprouvettes pour la réalisation de l'essai de tenue à l'eau s'est réalisée à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire (PCG) et un moule de 100 mm de diamètre. La teneur en vides a été déterminée par pesée hydrostatique et respecte celle demandée par la méthode d'essai. La hauteur des éprouvettes était de 66 ± 1 mm. Les éprouvettes en condition saturée ont un degré en saturation moyen de 72,4 %, ce qui est conforme à la méthode. La Figure A.6 présente les résultats de tenue à l'eau de l'enrobé malaxé en usine.

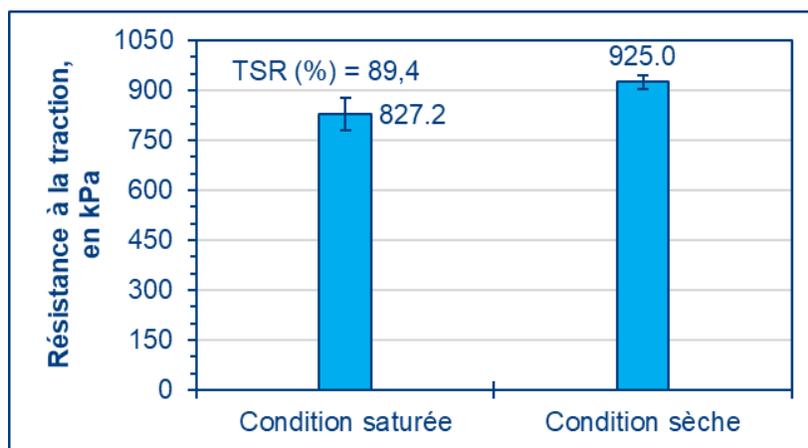


Figure A.6. Résultats détaillés de la tenue à l'eau (phase chantier)

L'enrobé fabriqué à l'usine présente une meilleure tenue à l'eau que l'enrobé formulation. Les résultats présentent un TSR de 89,4 %, l'enrobé respecte donc les spécifications du devis (TSR $\geq 85,0$ %).

