



Étude de la performance du rouleau à pieds-de-mouton pour le compactage de matériaux recyclés de type MR5

Par **Vincent Carrier**, ing. jr, étudiant à la maîtrise
Jean-Pascal Bilodeau, ing., Ph. D., professionnel de recherche
Guy Doré, ing., Ph. D., professeur titulaire
Chaire de recherche industrielle i3C, département de Génie civil et de Génie des eaux, Université Laval

Le recyclage des chaussées de béton bitumineux est une solution de réhabilitation performante et rapide et offre de nombreux avantages environnementaux. La technique du retraitement en place des chaussées souples par décohéssionnement, aussi appelé *Full-Depth Reclamation* (FDR), permet la réutilisation des granulats, encore compétents, présents dans la chaussée à réhabiliter par la création d'une couche de fondation recyclée. D'un point de vue de développement durable, la technique est avantageuse, car elle permet notamment de réduire la quantité de déchets solides engendrée par les travaux en plus de réduire l'utilisation de granulats vierges, dont les quantités sont de plus en plus limitées.

Ce procédé permet la réhabilitation de chaussées montrant des détériorations telles que fissures transversales et longitudinales, nids-de-poule, carrelage, etc. tout en minimisant grandement l'entrave au trafic causée par les travaux, en comparaison avec une reconstruction. Il ne permet toutefois pas de régler des problèmes de comportement de la chaussée provenant des couches inférieures, tel que la gélivité du sol d'infrastructure. Le retraitement en place consiste sommairement à décohéssionner l'enrobé bitumineux en intégrant une certaine épaisseur de la couche de fondation. Le produit de ce procédé est une couche contenant des granulats bitumineux recyclés (GBR) et des granulats naturels (GN). La technique peut aussi permettre d'effectuer une correction granulaire par rechargement ou d'améliorer la rigidité de la couche de fondation recyclée par un processus de stabilisation au liant de bitume ou par l'ajout de ciment. Des travaux de recherches récents (Kim & Labuz 2007; Depatie 2013) ont montré que l'ajout de GBR n'a que peu d'effet sur le module réversible. En revanche, l'ajout de GBR augmente la sensibilité du matériau à la déformation permanente. Cela se traduit par un orniérage potentiellement plus important de la couche de fondation. Ceci a notamment été mis en évidence par des essais avec un simulateur de charge à l'Université Laval, où une déformation permanente finale d'une fondation de type MR-5 a été 2,6 fois plus élevée que celle de type MG-20.

Par ailleurs, le produit du décohéssionnement est une couche de compacité lâche et de granulométrie plus grossière qu'un MG-20, et qui est généralement d'épaisseur importante pouvant dépasser les 300mm. La mise en place d'une telle couche demande un compactage rigoureux afin d'assurer un comportement adéquat. Il est généralement admis que la densité, exprimée par le degré de compactage (DOC), du matériau joue un rôle primordial au niveau de la déformation permanente (Lekarp et al. 2000). La présence d'un gradient vertical de densité est possible si une couche granulaire épaisse est compactée avec un rouleau lisse standard. Les travaux de

Depatie (2013) ont effectivement permis d'observer la présence d'un tel gradient sur une couche de fondation recyclée par retraitement en place. Cet état de densité peut entraîner un phénomène d'orniérage à court terme en plus d'affecter la pérennité de la structure de chaussée.

Dans le cadre d'un projet de maîtrise au sein de la chaire de recherche industrielle i3C de l'Université Laval, des planches expérimentales *in situ* ont été construites, en collaboration avec le Laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec. La comparaison du compactage d'une couche granulaire MR-5 (50% GBR) avec un rouleau à pieds-de-mouton et un rouleau lisse a été étudiée. De plus, un volet laboratoire comportant des essais triaxiaux et au simulateur routier a été réalisé, afin d'étudier le comportement mécanique des MR5 et l'effet d'un gradient vertical de densité sur la performance du matériau.

Programme expérimental

L'utilisation du rouleau compacteur de type pieds-de-mouton (PM) vibrant pour la réalisation du compactage initial est une solution potentielle à la présence d'un gradient vertical de densité. Contrairement aux pratiques québécoises, de nombreux départements de transports américains utilisent systématiquement ce rouleau pour le compactage du produit de décohéssionnement. Le principe théorique de fonctionnement est la densification du bas vers le haut. Le remaniement de la surface supérieure causé par les pieds du rouleau combiné à l'énergie de vibration procure potentiellement un compactage plus efficace en profondeur, pour les couches épaisses. Afin d'évaluer la performance du rouleau PM en comparaison avec un rouleau lisse (RL) de format similaire, présentés à la figure 2, les travaux de terrains comportent trois sections d'essais allant comme suit :

- Rouleau PM vibrant (PM), longueur de 17,5 m;
- Rouleau PM sans vibration (PM-sv), longueur de 6 m;
- Rouleau lisse vibrant (RL), longueur de 17,5 m.

Il est à noter que la longueur des planches est celle où des essais ont eu lieu. Des zones de transitions de 2 à 3 m séparent les planches afin d'éviter des interactions dans les résultats. Les principaux éléments comparatifs à l'étude sont l'effet destructif du rouleau sur les granulats, la rigidité de la couche compactée ainsi que la présence ou non d'un gradient vertical de densité. L'effet de la vibration est aussi étudié puisque la présence de

certain réseaux souterrains peut parfois limiter l'utilisation d'un rouleau vibrant. Bien qu'il soit largement accepté que le compactage des matériaux granulaires est plus optimal avec la vibration, l'effet de remaniement de la surface avec le rouleau PM pourrait potentiellement offrir un certain gain.

À la suite du processus de compactage, les essais suivants ont été réalisés :

In situ :

- Défectomètre à masse tombante portatif (LWD)

Détermination de la variabilité ainsi que la qualité, en ce qui concerne la rigidité de la couche

- Nucléodensimètre (*Troxler-3450*)

Lecture de la densité à une profondeur de 100 et de 200 mm

- Pénétrömètre dynamique au cône (DCP)

Profil vertical de l'indice de pénétration (pouvant être relié à la compacité relative)

Laboratoire :

- Analyses granulométriques

Dégradation physique des granulats (génération de sable et de fines)

- Déformation permanente (essais triaxiaux, norme EN 13286-7)

Comportement mécanique d'une couche avec gradient vertical de densité

Processus de compactage

Les planches d'essais sont d'une épaisseur initiale de 35 cm et aucune machinerie n'est passée sur la surface, alors il s'agit de matériau dans un état très lâche. La procédure de compactage est comparable à celle d'une planche de référence. Le degré de compactage (DOC) a été mesuré au nucléodensimètre en trois points, entre les passes de rouleau, jusqu'à l'atteinte de la cible de 98%. En raison des empreintes des pieds du rouleau PM, la lecture au nucléodensimètre n'était pas possible. Puisque le projet visait à suivre l'évolution du DOC entre les passes, la surface a été nivelée manuellement et une passe de rouleau lisse a été effectuée entre les passes de PM pour permettre la lecture au nucléodensimètre. De ce fait, l'énergie totale de compactage est supérieure pour la planche au rouleau PM. Au niveau de la planche PM-sv, l'évolution du DOC n'a pas été suivie, car la planche est comparée directement à celle PM, alors le nombre de passes de rouleau devait être identique.

Résultats

Le nombre de passes doubles afin d'atteindre le DOC cible a été de 5 pour la planche au rouleau lisse tandis que celle du rouleau PM de 10, soit 3 passes en continu du PM puis une

alternance du rouleau lisse et PM jusqu'à l'obtention du DOC cible. L'énergie totale de compactage est donc supérieure pour la planche PM, mais il est important de mentionner que le suivi du DOC au nucléodensimètre considère la densité moyenne jusqu'à la profondeur de mesure à 200 mm. Puisque les pieds du rouleau remanient continuellement la surface, tel que montré à la figure 3, il se peut que la mesure ait été affectée à la baisse, ce qui a nécessité ce nombre aussi élevé de passes. La méthode de suivi du DOC au nucléodensimètre ne semble donc pas adaptée au compactage initial, avec un rouleau PM, de la couche décohésionnée.

Au niveau des essais au LWD, il n'y a statistiquement pas de différence significative entre la planche RL et PM, les moyennes étant respectivement de (118 ± 19) MPa et de (122 ± 13) MPa. Le coefficient de variation, soit l'écart type divisé par la moyenne, est toutefois supérieur pour la planche RL ce qui indique une variabilité potentiellement plus importante. La planche PM-sv présente une moyenne légèrement inférieure de (109 ± 11) MPa. La profondeur d'influence du LWD dépasse toutefois l'épaisseur de la couche, alors l'influence de la couche granulaire sous la planche d'essais peut masquer la différence de rigidité entre les planches d'essais.

L'essai au nucléodensimètre permet cette fois de cibler la couche compactée, et ce à deux profondeurs de mesure. Cette double lecture permet d'identifier la présence potentielle d'un gradient vertical de densité. Puisque la mesure donne une densité moyenne entre l'émetteur et le récepteur, si la lecture à 100 mm est supérieure à celle à 200 mm, il est possible de conclure que la densité de la zone 0-100 mm est plus élevée que celle de la zone 100-200 mm et vice-versa. La mesure du DOC s'est faite sur quinze points de mesure (100 et 200 mm) sur les planches PM et RL, tandis que la planche PM-sv, étant plus courte, a inclus sept points. Les moyennes du DOC sont présentées à la figure 4. Tel qu'attendu, l'effet de la vibration sur le degré de compactage atteint est non négligeable, si l'on compare la planche PM et PM-sv. Il est possible d'observer que la mesure à 100 mm est plus faible que celle à 200 mm pour les deux planches avec pieds-de-mouton. L'effet contraire est observé sur la planche RL, mais de manière moins prononcée. En termes de proportion, 80% des mesures à 100 mm sont plus faibles qu'à 200 mm pour la planche PM contre 40% pour la planche RL. Bien que le DOC moyen entre les planches soit comparable et que la mesure de la densité au nucléodensimètre inclut une légère incertitude, l'analyse des résultats montre un meilleur compactage du fond de couche lors de l'utilisation du rouleau à pieds-de-mouton vibrant. La zone inférieure de la couche n'a toutefois pas été investiguée, puisque l'épaisseur finale est d'environ 26 cm et que la mesure de cet essai ne se fait qu'à 20 cm de profondeur. C'est pourquoi l'essai au DCP présente un certain avantage pour sonder cette zone.

Bien qu'il n'existe pas de corrélation directe entre l'extrait de l'essai au pénétromètre dynamique (indice de pénétration, mm/coup) et la densité de la couche, il est généralement accepté

L'enrobé avec du RapJak™ est 100% recyclable à la fin de sa vie utile.

Le RapJak™ permet :

- de surpasser 20% de GBR sans compromettre la performance en service;
- d'ajouter 10% à 65% de GBR sans modifier le PG;
- de contrôler l'aptitude au compactage.

Le RapJak™ :

- maintient la tenue à l'eau, la cohésion et la performance à l'orniérage;
- ne modifie pas la performance de l'enrobé à basse température.

Le RapJak™ n'affecte pas les caractéristiques, la performance MSCR ni la recouvrance élastique du bitume.

Résistance aux déformations

Application de pointe

Protège l'environnement

Jugez-en en l'utilisant

Adapte l'additif aux revêtements bitumineux

Kms de routes écoresponsables



Ensembles vers un asphalte plus vert

Un produit Québécois

rogitez Inc.

76 boul. Hymus • Pointe-Claire
QC • Canada • H9R 1E3
www.rogitez.com

qu'un indice élevé est signe de faible compacité. Dans le présent projet, une corrélation entre l'indice de pénétration et le module de rigidité tirée des travaux de Chen et al. (2005) a été utilisée. Les zones de modules élevés sont donc signe d'un meilleur compactage. La figure 5 présente les modules (corrélation avec le FWD) des différentes planches d'essais. Les résultats confirment l'observation de l'effet de la vibration sur le DOC, en présentant des modules de la planche PM-sv très inférieurs à ceux de la planche PM. De manière générale, le module est plus élevé dans la planche PM, ce qui suppose un meilleur comportement mécanique de la couche que la planche RL. En comparant les modules de la zone inférieure de 20 à 26 cm, il est possible d'observer des zones de faible module dans la planche RL. Cela signifie que le compactage de cette zone inférieure est possiblement de moins bonne qualité. Cet aspect, n'ayant pas pu être observé lors des mesures au nucléodensimètre, semble être dans la littérature une des raisons de l'utilisation du rouleau PM pour le compactage de telles couches granulaires épaisses.

Finalement, les analyses granulométriques avant et après compactage, en fonction du type de rouleaux utilisé, ont permis d'observer une agressivité légèrement supérieure du rouleau à pieds-de-mouton en comparaison avec le rouleau lisse. La figure 6 présente la différence, selon le type de rouleau, du % passant après le compactage et celui du matériau initial avant compactage pour différents tamis. Il est possible d'observer que le rouleau PM engendre une certaine détérioration des granulats, principalement au niveau de la génération de particules de sable. En ce qui concerne la génération de fines, la différence entre les rouleaux n'est pas considérable.

Limitations de l'étude

En raison du suivi de la densité au nucléodensimètre lors du compactage avec le rouleau à pieds-de-mouton, il est important de nuancer les résultats de l'étude. En effet, dans le cas d'un chantier réel de retraitement en place, le compactage initial effectué à l'aide de ce rouleau se fait en continu jusqu'à l'obtention d'un enfoncement limité des pieds. Communément appelé «*step out*», cet état de compactage est jugé acceptable puisque la couche est bien compactée en profondeur et résiste à l'enfoncement des pieds. Le processus de compactage est ensuite poursuivi avec le nivellement de la surface et le compactage final au rouleau lisse. Dans le présent projet, puisqu'un intérêt a été porté au suivi de l'augmentation du DOC de la couche tel que réalisé lors d'une planche de référence, le rouleau n'a pas été passé en continu. Le gain de performance lié au remaniement de la surface par les pieds du rouleau a potentiellement été atténué par ces passes de rouleau lisse entre les passes de rouleau PM.

Perspectives

Tel que montré dans ce projet, l'utilisation du rouleau à pieds-de-mouton semble bénéfique afin d'assurer une bonne qualité du compactage de la zone inférieure des couches granulaires d'épaisseur importante. Bien que son utilisation exige l'ajout d'un élément au processus de compactage, le gain de qualité sur le produit final apparaît non-négligeable afin de limiter l'apparition d'orniérage de post-compactation à court terme et d'assurer un comportement mécanique représentatif de celui considéré lors du dimensionnement de la chaussée.

Dans le cadre de travaux futurs, il sera intéressant d'étendre l'étude de ce rouleau à des épaisseurs de couches plus importantes ainsi qu'au compactage de matériaux autres, tels que les sables. L'effet de remaniement et de compactage en profondeur pourrait alors être bénéfique pour la mise en œuvre de couches de sous-fondation. Une réduction de coûts est potentiellement envisageable, notamment si l'épaisseur de mise en place peut être augmentée sans engendrer de sous-compactage du fond de couche ou si le gain d'énergie de compactage engendre un nombre de passes nécessaires plus faible sur de telles couches d'épaisseur plus importante. Le projet met aussi de l'avant la nécessité de porter une attention particulière au processus de compactage initial lors de chantier de retraitement en place puisque l'effet d'un sous-compactage du fond de couche peut entraîner une réduction de la durée de vie de l'ouvrage. En somme, des projets pilotes sur des chantiers de retraitement en place seront nécessaires, dans l'optique d'inclure cet équipement de compactage au processus de recyclage des chaussées au Québec et ainsi assurer un gain au niveau du comportement et de la pérennité de ces ouvrages.

Références

- Chen, D-H. et al. (2005). A Correlation Between Dynamic Cone Penetrometer Values and Pavement Layer Moduli. *Geotechnical Testing Journal* 28(1): 123-12.
- Depatie, Jonas (2013). Évaluation des propriétés mécaniques et physiques des matériaux bitumineux recyclés produits par retraitement en place. Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval.
- Kim, W. & Labuz, J.F. (2007). Resilient Modulus and Strength of Base Course with Recycled Bituminous Material. Rapport MN/RC-2007-05, Minnesota Department of Transportation, 270 p.
- Lekarp, F. et al. (2000). State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126 (No. 1): 76-83.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports du Québec pour leur participation dans la réalisation des travaux de terrains ainsi que l'ensemble des partenaires de la chaire de recherche industrielle i3C du CRSNG au département de génie civil de l'Université Laval.



Figure 1 : Simulateur routier de l'Université Laval

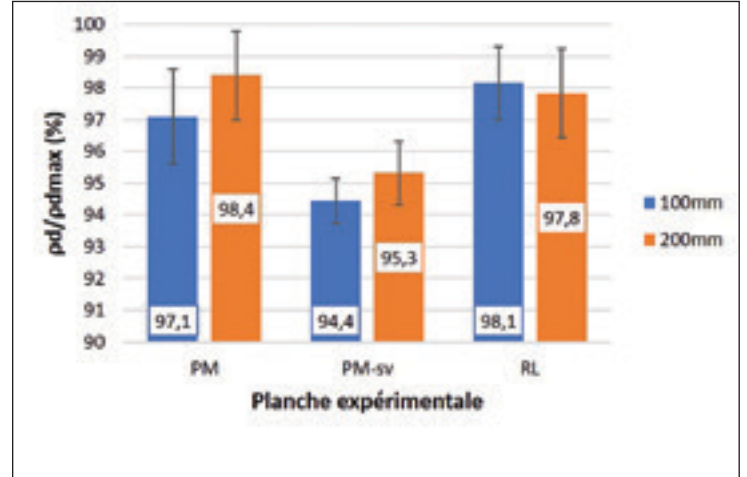


Figure 4 : Degré de compactage mesuré à l'aide du nucléodensimètre



Figure 2 : Rouleaux compacteurs

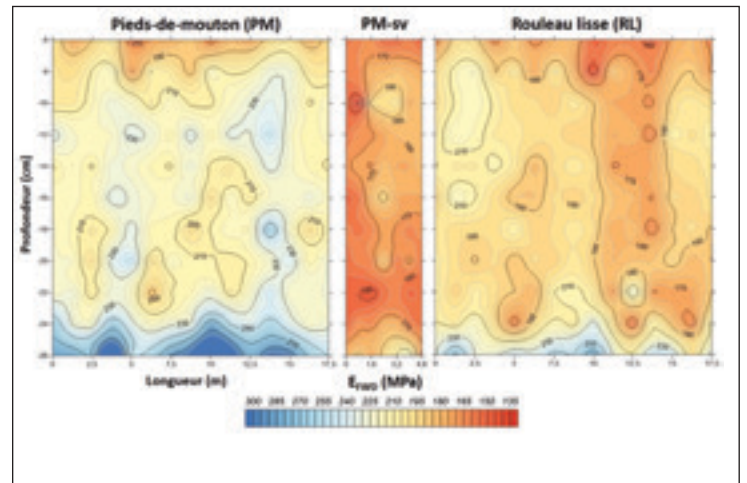


Figure 5 : Module du produit du compactage corrélé à partir des essais au DCP



Figure 3 : Surface à la suite des premières passes avec le rouleau à pieds-de-mouton

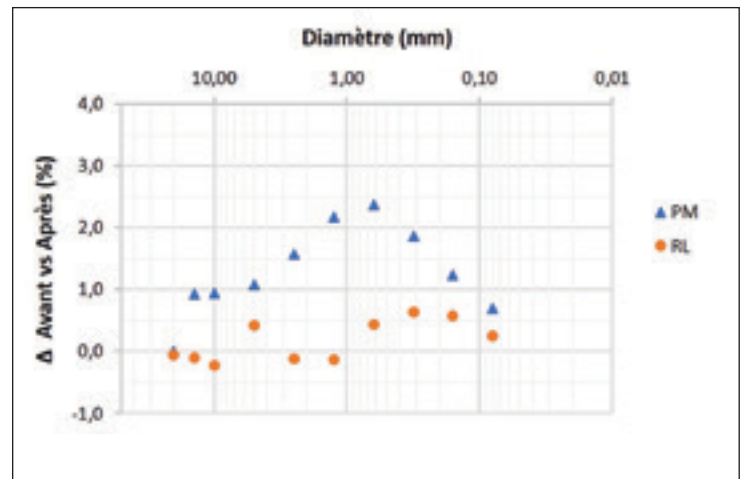


Figure 6 : Variation de la taille des particules à partir d'analyses granulométriques