



Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées



Matériaux recyclés dans les fondations : Propriétés et mise en oeuvre

Jonas Depatie – Phase 1 – 2013

Évaluation des propriétés mécanique et physique des matériaux bitumineux recyclés produits par retraitement en place.

Vincent Carrier – Phase 2 – 2020

Comportement en déformation permanente et mise en œuvre des matériaux recyclés de type MR5

Jean-Pascal Bilodeau

Guy Doré



Faculté des Sciences et de génie
Département de génie civil



Introduction et problématique

Performance d'une chaussée flexible

- Liée aux matériaux granulaires (MG)

Épuisement des sources de MG près des grands centres

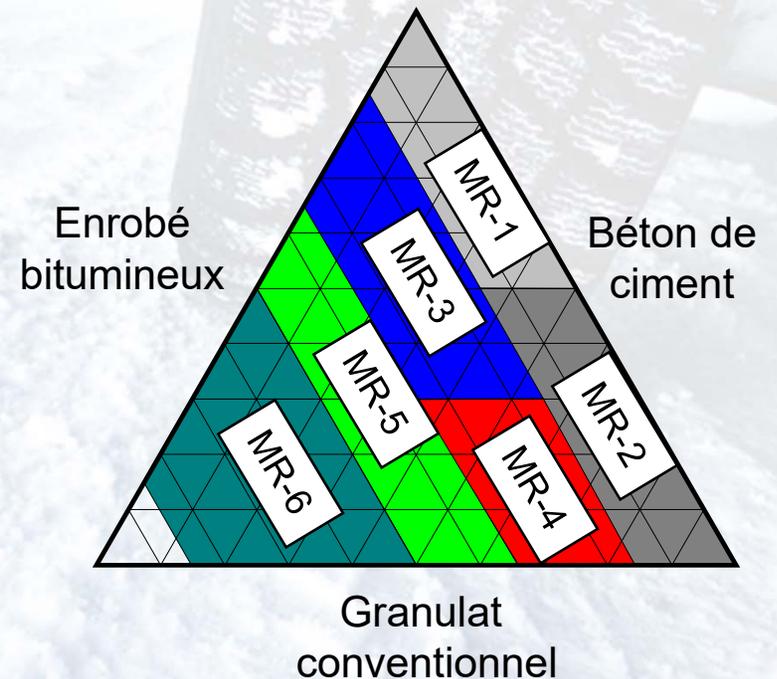
- \$ de transport, considérations environnementales

Production de résidus de démolition

- % important → résidus d'EB (RAP)
- RAP constitués de très bons granulats enrobés de bitume

Réutilisation des RAP comme MG

- Mélangés aux granulats vierges, bénéfique pour l'environnement



BNQ2560-600



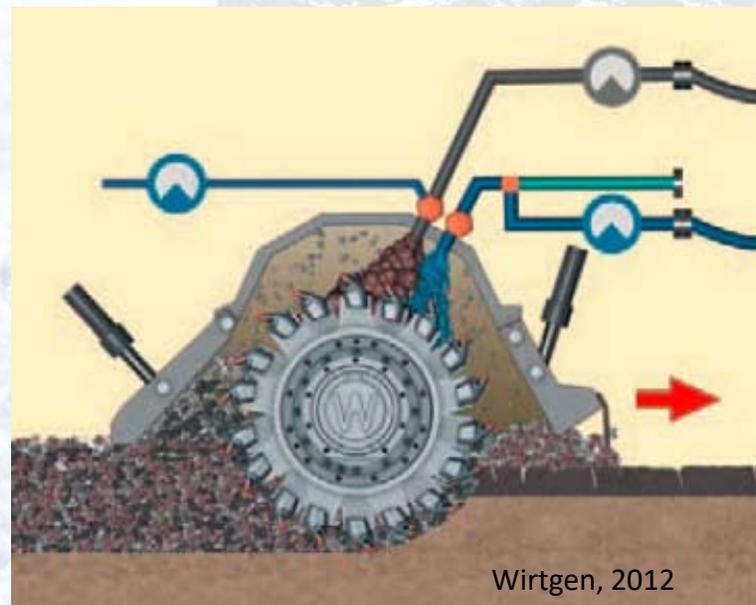
Mise en contexte

Recyclage des chaussées souples

- Réduction des déchets
- Production de MR

Retraitement en place

- Rapidité
- Solution aux dégradations de surface (Bergeron 2005)



Wirtgen, 2012



Matériaux recyclés en fondation

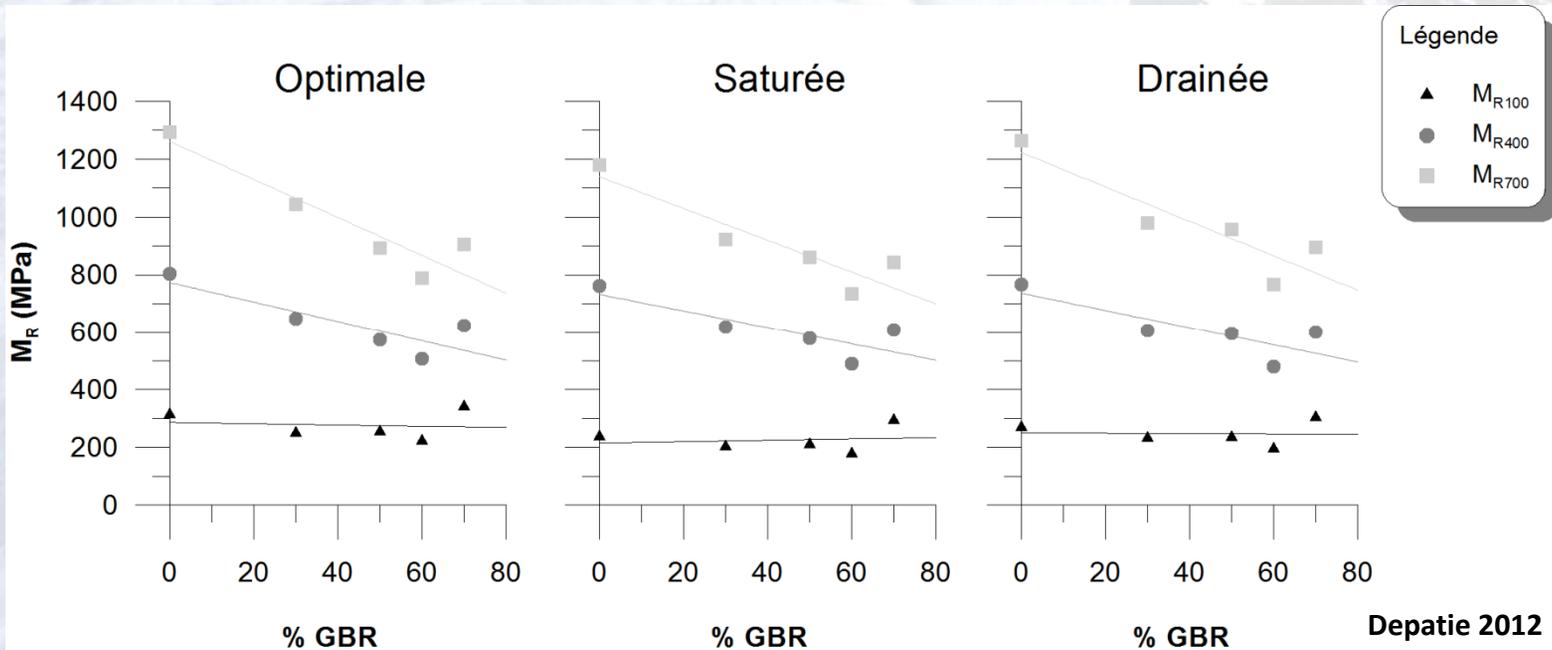
Études	Mélange GBR/GN	Densité sèche	OMC	Susceptibilité à l'eau	CBR	Module réversible	Déformation permanente
Sayed (1993) ²	N	-	↓	-	↓	-	-
Bergeron (1995) ²	O	↓	-	↓	↓	↓	-
Garg & Thompson (1996) ²	N	↓	↑	-	↓	-	-
Papp (1998) ²	O	↓	↓	-	-	↑	-
Mac Gregor (1999) ²	O	-	-	Peu/Pas effet	-	↑	-
Taha (1999) ²	O	↓	-	Peu/Pas effet	↓	-	-
Bennert & Maher (2005) ²	O	↓	↓	↑	-	↑	-
Cooley (2005) ²	O	↓	↓	-	↓	-	-
Trzebiatowski (2005) ²	N	↓	-	↓	-	-	-
Guthrie (2007) ²	O	↓	↓	Peu/Pas effet	↓	-	-
Saeed (2008) ²	O	-	-	↓	-	Peu/Pas effet	↑
Attia (2009)	O	↓	↓ ²	-	-	↑	-
Locander (2009) ²	O	↓	↓	↓	-	-	-
Gupta S.C. (2009) ²	O	↓	↓	↓	-	↑	↑
Koostra (2010) ²	O	-	-	-	-	-	↑
Tabakovic (2010) ²	O	-	-	↓	-	-	-
Depatie (2013)	O	↓	↓	Peu/Pas effet	-	Peu/Pas effet	↑

Carrier 2020

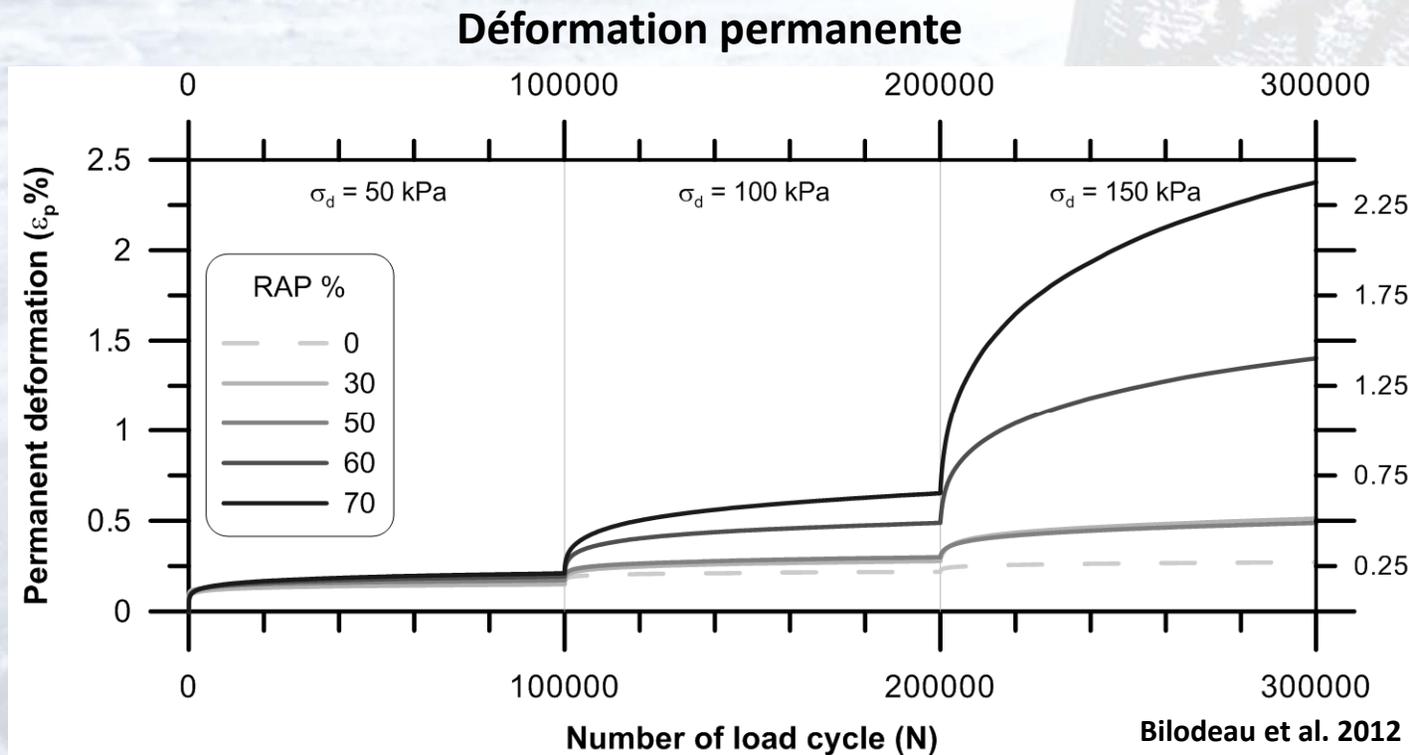


Comportement mécanique (triaxial cyclique)

Module réversible



Comportement mécanique (triaxial cyclique)



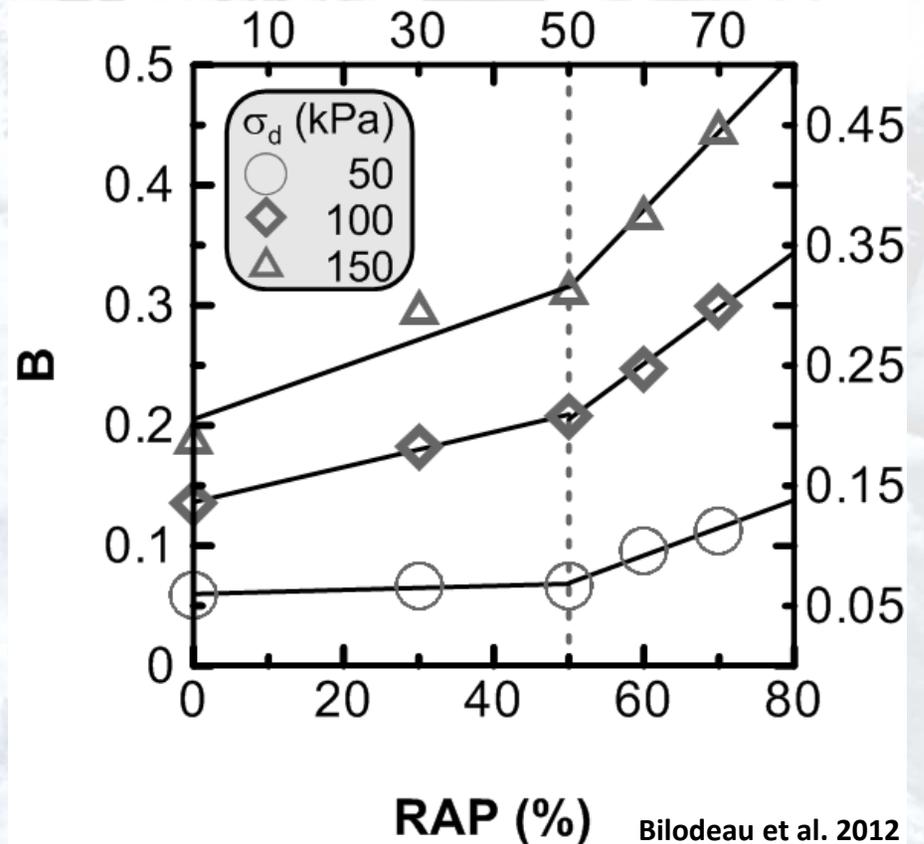
Déformation permanente

Taux de déformation B associé à la performance

- Influencé par %RAP et σ_d

Relation bilinéaire

- Inflexion à 50 %RAP
- $B = m * \%RAP + b$

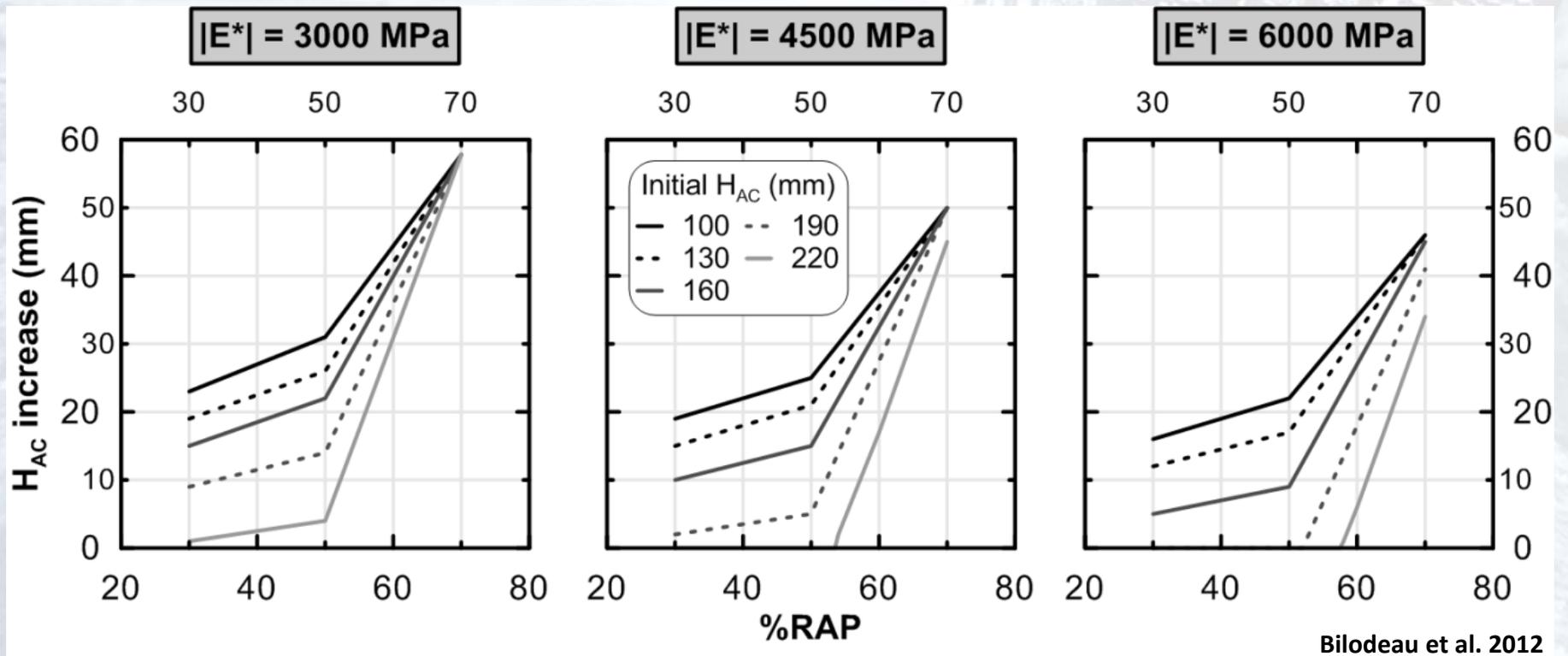


$$B = (2.4 \times 10^{-5} \sigma_d - 0.001)(\%RAP + 56.62) + 0.051 \quad \text{pour } RAP \leq 50\%$$

$$B = (4.3 \times 10^{-5} \sigma_d - 0.0002)(\%RAP + 5.41) - 0.056 \quad \text{pour } RAP > 50\%$$



Abaque de renforcement



Chantiers de retraitement en place

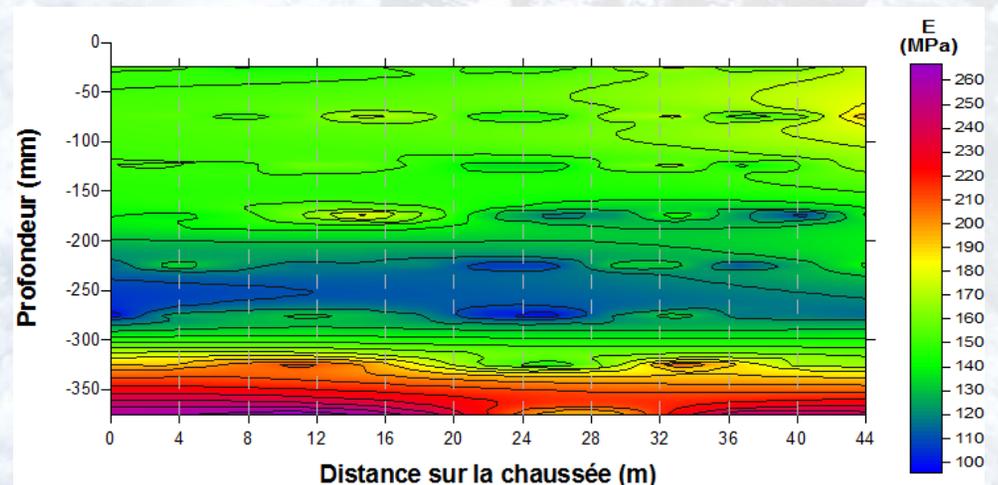
Étude de la variabilité du matériau

- Similaire à matériaux vierges

Étude sur la mise en œuvre

- Détection de zones sous-densifiées en fond de couche

Profil des modules E estimés à partir des DCPI (A-55)



Depatie 2012



Planches d'essai – *Mise en œuvre*

Type de compacteur et méthode

Échantillonnage

- Avant
- Après

Essais

- LWD
- DCP
- Nucléo.
- Granulométries

Carrier 2020



Pieds de mouton
avec vibration

Pieds de mouton
sans vibration

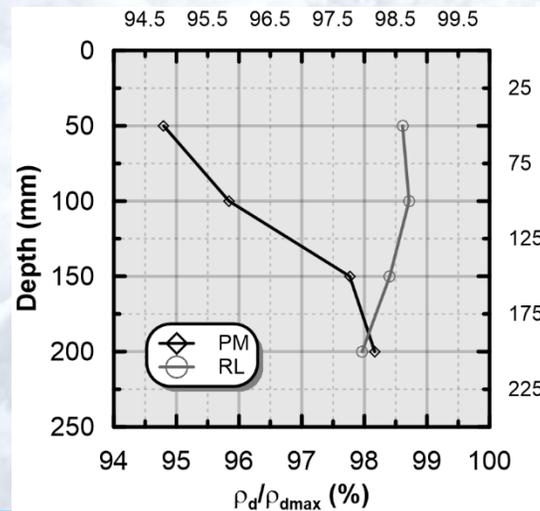
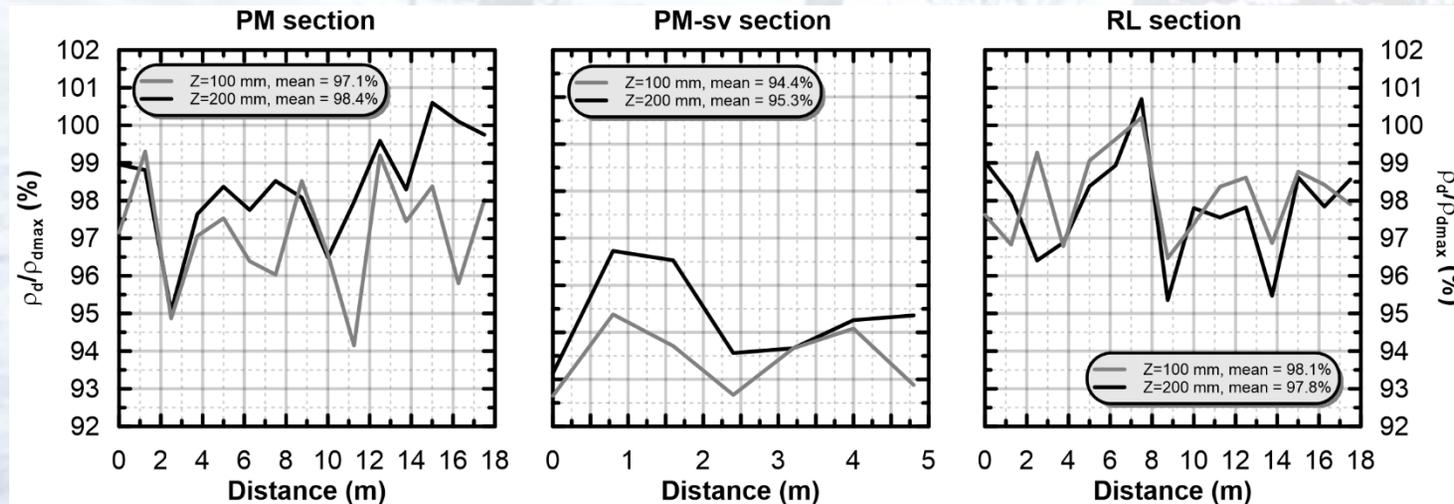
Rouleau lisse
avec vibration

Transition zone	PM Length = 17.5 m 15 samples @ 1.25 m	Transition zone	PM-sv Length = 5 m 7 samples @ 0.8 m	Transition zone	RL Length = 17.5 m 15 samples @ 1.25 m	Transition zone
-----------------	--	-----------------	--	-----------------	--	-----------------

Bilodeau et al. 2019



Planches d'essai – *Compacité*

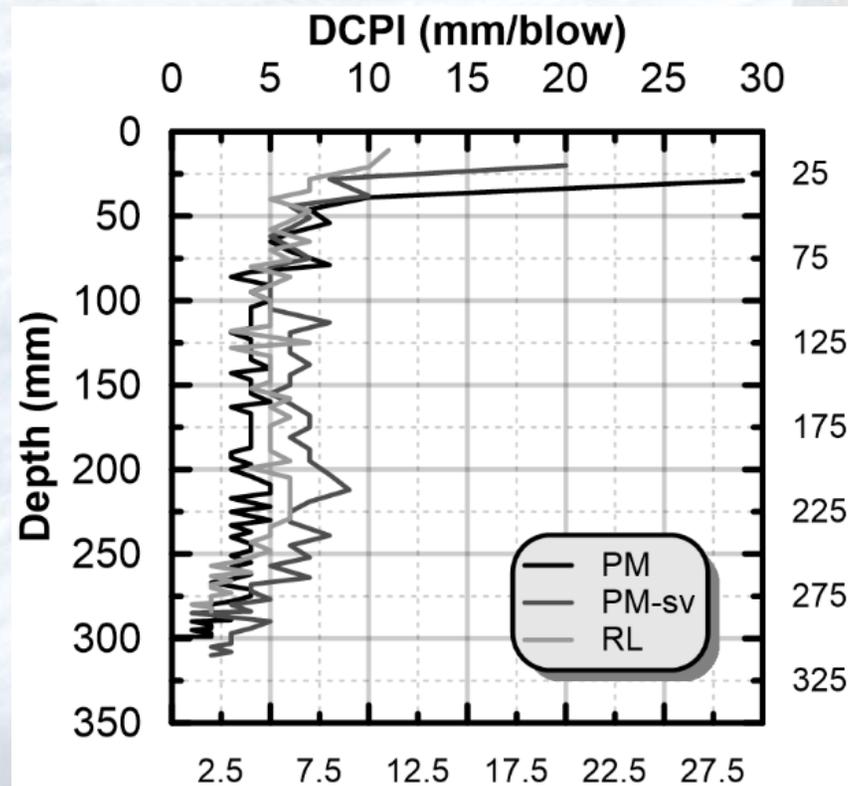


Bilodeau et al. 2019



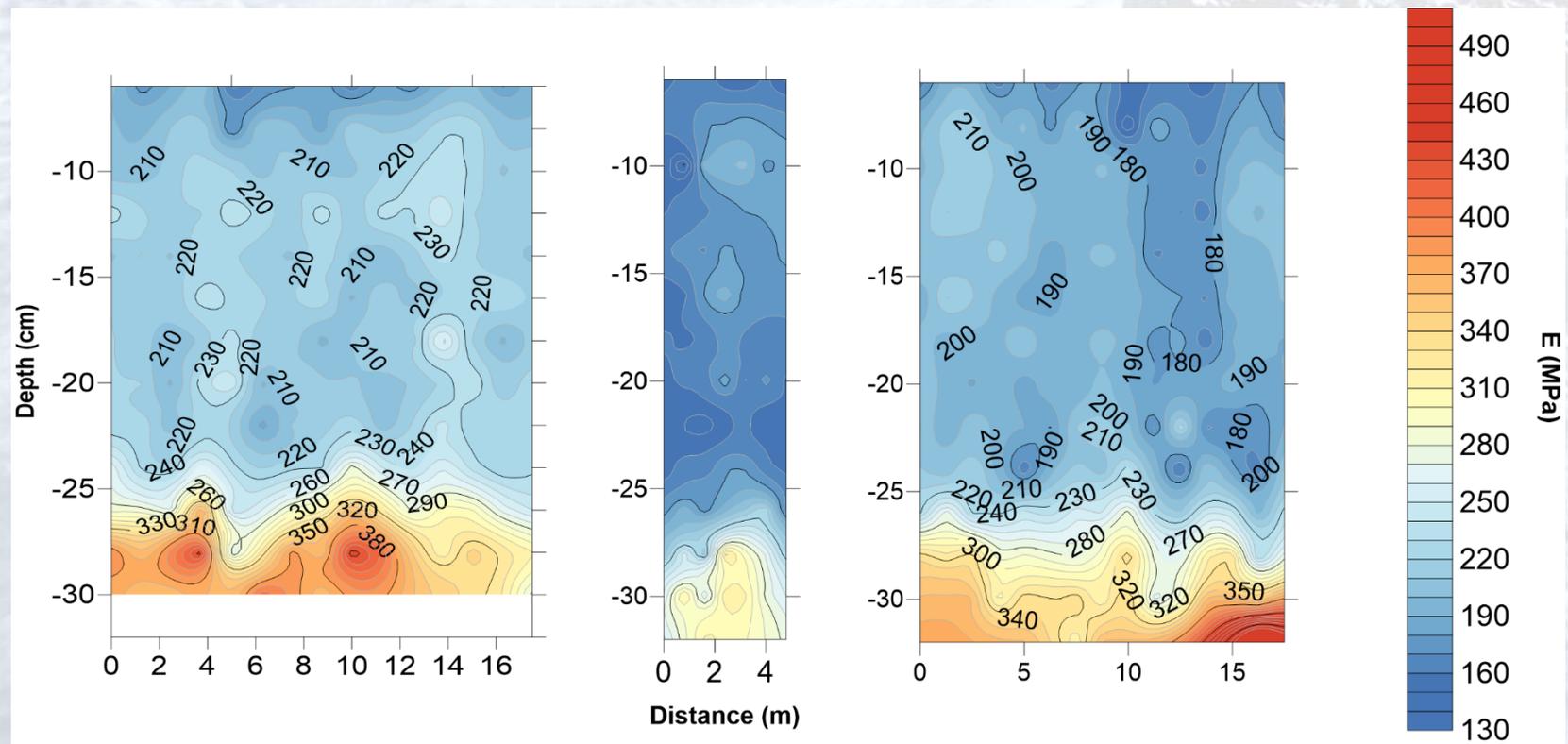
Planches d'essai – *Propriétés mécaniques*

- Essais de pénétration dynamique → E

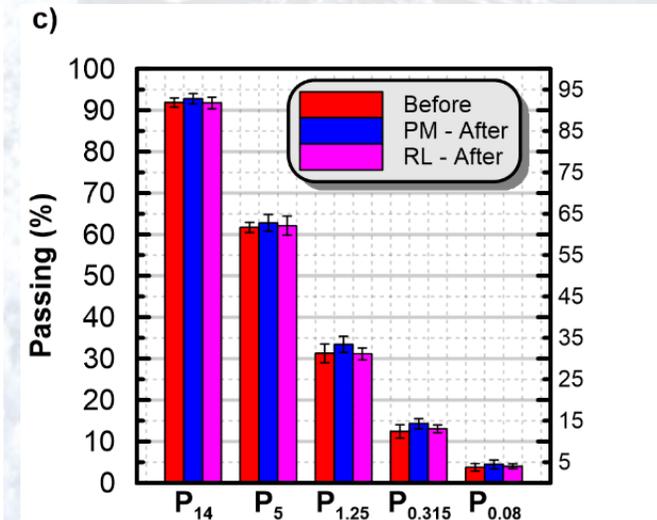
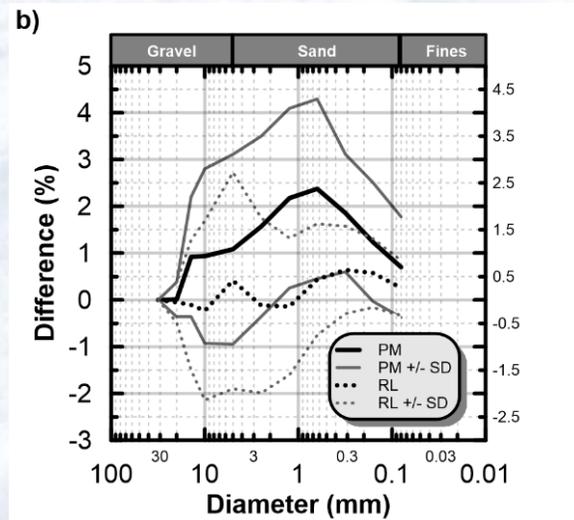
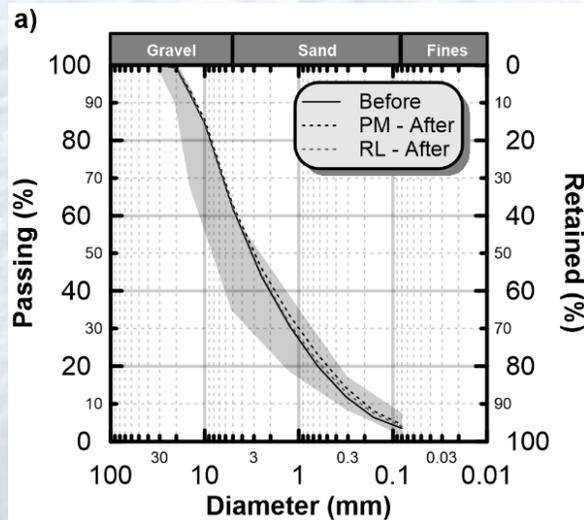


Planches d'essai – *Propriétés mécaniques*

- Essais de pénétration dynamique → E



Planches d'essai – *Changements granulométriques*



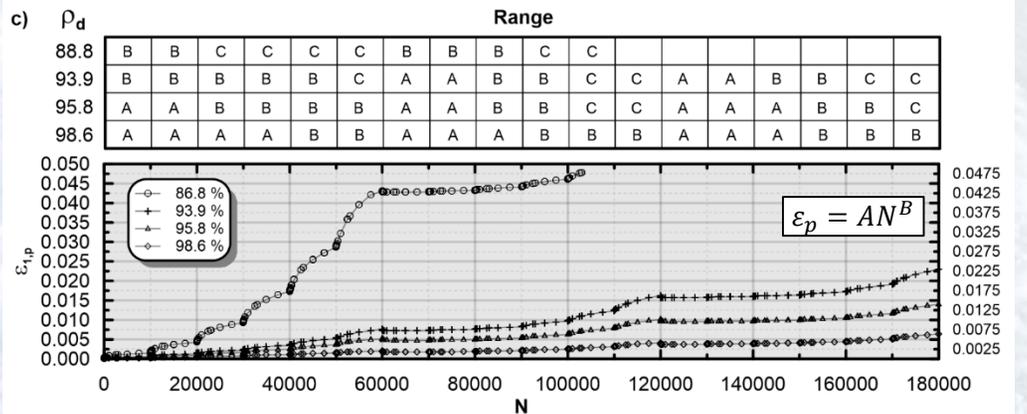
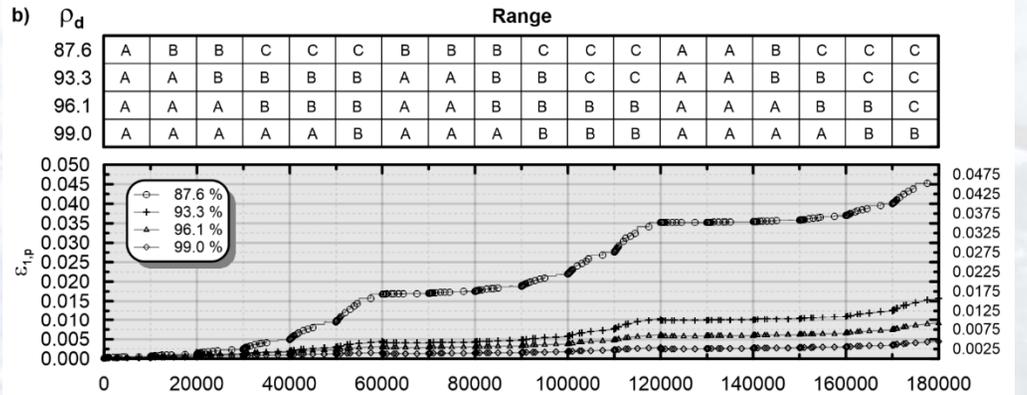
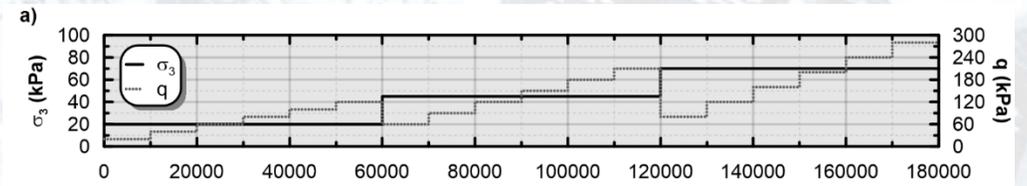
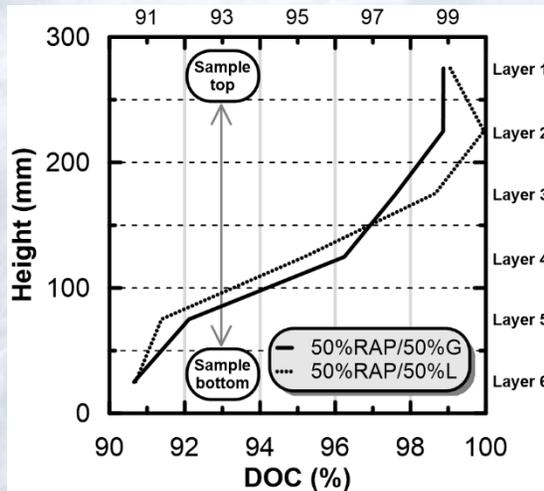
Bilodeau et al. 2019



Déformation permanente

Effet de la compacité

- Uniforme (3) :
88-90%, 93-95%, 98-99%
- Gradient (1) :
 $DOC_{moy} \approx 96\%$, 0-200 : 98%



Bilodeau et al. 2020



Déformation permanente

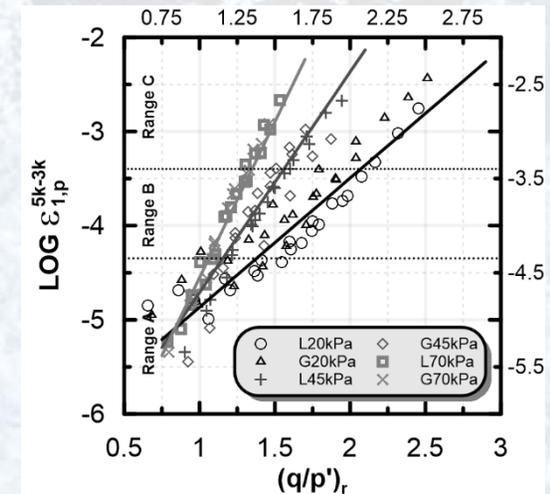
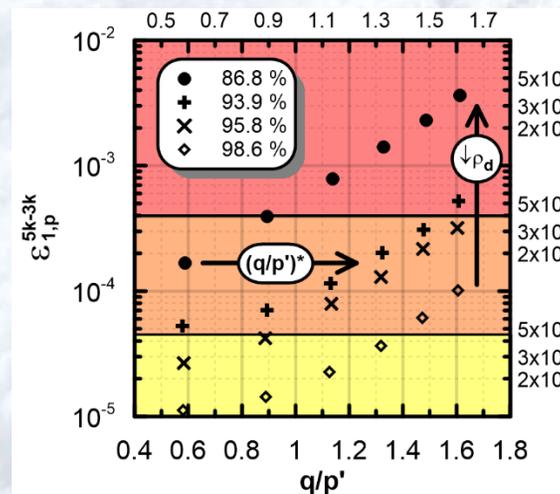
Analyse basée sur comportement shakedown

$$\text{LOG } \varepsilon_{1,p}^{5k-3k} = (0.0388 \times \sigma_3 + 0.5969) \times (q/p)_r + (-0.03252 \times \sigma_3 - 5.5899)$$

$$(q/p)_r = (q/p') + (q/p')^*$$

$$(q/p')^* = (-0.000685 \times \sigma_3 + 0.0867) \times (100 - \text{DOC}) + (-2.14 \times 10^{-5} \times \sigma_3 + 6.222 \times 10^{-5}) \times (100 - \text{DOC})^2$$

Principe d'équivalence
État contrainte / compacité



Bilodeau et al. 2020



Déformation permanente

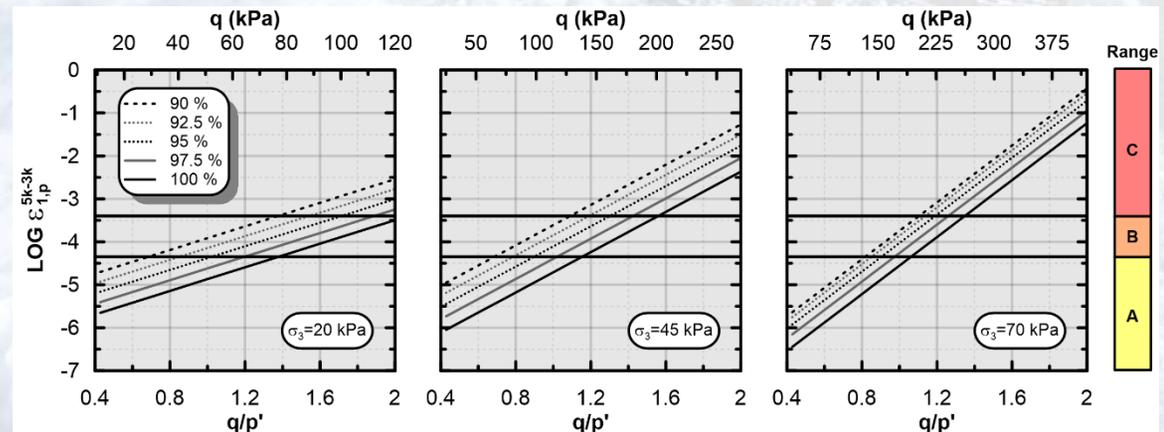
Analyse basée sur comportement shakedown

$$\text{LOG } \varepsilon_{1,p}^{5k-3k} = (0.0388 \times \sigma_3 + 0.5969) \times (q/p)_r + (-0.03252 \times \sigma_3 - 5.5899)$$

$$(q/p')_r = (q/p') + (q/p')^*$$

$$(q/p')^* = (-0.000685 \times \sigma_3 + 0.0867) \times (100 - \text{DOC}) + (-2.14 \times 10^{-5} \times \sigma_3 + 6.222 \times 10^{-5}) \times (100 - \text{DOC})^2$$

Principe d'équivalence
État contrainte / compacité



Bilodeau et al. 2020



Principales avancées

- Renforcement de chaussées en fonction %RAP
- Quantification du bénéfice d'une géogrille pour %RAP élevé
- **Évolution de la rigidité en chantier avec l'augmentation de la compacité**
- Documentation variabilité MR en chantier et identification problématiques mise en place
- Modèle de comportement en fonction de l'état de contrainte et de la compacité
- Quantification des bénéfices de la compaction « bottom-up »
- **Effet de température/fréquence lors du compactage des MR**



Références

- Carrier, V. 2020. Comportement en déformation permanente et mise en œuvre des matériaux recyclés de type MR5. **Mémoire de maîtrise**, Université Laval, Québec, Canada.
- Depatie, J. 2013. Évaluation des propriétés mécanique et physique des matériaux bitumineux recyclés produits par retraitement en place. **Mémoire de maîtrise**, Université Laval, Québec, Canada.
- Bilodeau, J.-P. and Gonzalez, E.L.P. 2020. Permanent Deformation Analysis of Base Layers with Recycled Material: Effect of Density and Stress Level. Accepted to **Transportation Geotechnics**.
- Bilodeau, J.-P., Doré, G. and Depatie, J. 2013. Mitigation of permanent deformation of base layer containing recycled asphalt aggregates. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 40(2): 181-187.
- Depatie, J., Bilodeau, G., and Doré, G. 2012. Evaluation of recycled base layers properties produced by full depth reclamation. Proceedings of the 2nd **International Conference on Transportation Geotechnics**, Miura et al. (eds), Hokkaido, Japan, 10-12 September 2012.
- Carrier, V., Bilodeau, J.-P. et Doré, G. 2019. Étude de la performance du rouleau à pieds-de-mouton pour le compactage de matériaux recyclés MR5. **Via Bitume**, 14(1), pp. 47-51.
- Bilodeau, J.-P. et Doré, G. 2014. Renforcement structural des chaussées flexibles contenant des résidus d'enrobé bitumineux concassés en fondation. **Via Bitume**, Vol. 9, No. 3 :pp. 36-37.





Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées

Questions et commentaires ?

Merci de votre attention !

Partenaires

A grid of logos for various partners. The logos include:

- UNIVERSITÉ LAVAL: Faculté des Sciences et de génie, Département de génie civil
- GRINCH: GROUPE DE RECHERCHE EN INGÉNIERIE DES CHARGÉES
- CRSNG NSERC
- ACRGTQ: Association des Camionneurs du Québec
- opSens
- PLURITEC: ingénieurs-conseils
- COLAS: La route avance
- FPIinnovations
- ROCHE
- Texel GEOSOL
- GROUPE-CONSEIL FORCHEMEX: Pionniers de la recherche et de l'innovation
- Hydro Québec
- Montréal
- Ministère des Transports Québec
- VILLE DE QUÉBEC