
Caractérisation des performances des bétons compactés aux rouleaux à base de granulats recyclés

Ines Boussetta¹, Saloua El Euch Khay¹, André Lecomte²,
Jamel Neji¹

1. Laboratoire de matériaux, d'optimisation et d'énergie pour la durabilité (LAMOED), université Tunis El Manar, École nationale d'ingénieurs de Tunis, BP 37, Le Belvédère, 1002, Tunis, Tunisie
b.ines.boussetta@gmail.com, eleuchsaloua@yahoo.fr, jamel.neji@enit.rnu.tn
2. Institut Jean-Lamour, UMR 7198, Équipe matériaux pour le génie civil, IUT Nancy-Brabois, rue du Doyen-Urion, 54601 Villers-lès-Nancy, France
andre.lecomte@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence de l'ajout des fraisâts d'enrobés dans la formulation de bétons compactés au rouleau (BCR) structurants. Plusieurs mélanges de BCR ayant différents pourcentages de fraisâts ont été formulés et testés mécaniquement. Les résultats obtenus montrent que les performances mécaniques du BCR diminuent avec le pourcentage de fraisât ajouté, ce qui est en parfait accord avec les résultats trouvés par d'autres équipes de recherche à travers le monde. Pour mieux appréhender cette baisse de caractéristiques, des observations microscopiques ont été réalisées et ont bien confirmé la présence du film de mastic bitumineux enrobant les granulats et pouvant affecter ainsi l'adhérence granulats/pâte de ciment. Ces mêmes observations microscopiques ont montré la subsistance de phases hydratées de même nature que celles des bétons sans fraisât : portlandite (C-H), silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des ettringite sous forme d'aiguilles bien compactées, ce qui montre que l'hydratation n'a pas été affectée. Nous avons ensuite mis en exergue l'effet du film de mastic bitumineux en adoptant le modèle hyperbolique de prédiction de la résistance à la compression de De Larrard qui a confirmé que l'adhérence mortier-granulat dans l'auréole de transition diminue en présence de ce mastic enrobant les granulats recyclés.

ABSTRACT. The aim of this research is to evaluate the effects of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on the performance of roller compacted concrete (RCC) mixtures. Several RCC mixtures with different percentages of RAP were formulated and tested mechanically. Results showed that as the percentage of RAP increases, the PCC mechanical properties decrease. This is entirely in agreement with the results of other research teams. To better understand the decrease of mechanical properties, microscopic observations were performed. Results confirmed the presence of the bitumen film, which coated aggregates and could affect consequently the adhesion between aggregates and cement mortar. These microscopic observations showed also that the hydration of cement proceeded in a normal manner with the presence of RAP particles with the formation of portlandite (C-H), calcium silicate hydrate (CSH) and ettringite in the form of well-compacted needles. Finally, we have highlighted the effect of the bituminous mastic film by

adopting the hyperbolic prediction model of compressive strength proposed by De Larrard et al., which has confirmed that the adhesion between aggregates and cement mortar in the interfacial transition zone decreases with the presence of the bitumen film which coated RAP aggregates.

MOTS CLÉS : béton compacté au rouleau, fraisât d'enrobé, performances mécaniques, observation microscopique, modèle hyperbolique.

KEYWORDS: roller compacted concrete, reclaimed asphalt pavement, mechanical performances, microscopic observations, hyperbolic model.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00011 © 2017 Lavoisier

Extended abstract

Roller Compacted Concrete (RCC) is a concrete composed of the same basic ingredients as conventional concrete (aggregates, cement, water, admixtures, and cementitious additions), but with different proportions to obtain a zero-slump consistency. Its placement requires an important compaction energy to reach the desired compactness. Using reclaimed asphalt pavement (RAP) in the formulation of RCC is part of sustainable development approach.

The aim of this research is to evaluate the effects of RAP as substitute of natural aggregate (NA) on the mechanical properties of RCC.

The investigation began with an experimental program in order to well-characterize the materials to be used, which are NA (sand and gravel), RAP (RAP sand and RAP gravel) and cement. Then a formulation study was undertaken using the BétonLabPro2 software, which is based on the compressible packing model developed by LCPC, where a formula based on 100% NA was designed. For the other formulas, a volumetric substitution of NA with RAP was applied. For all mixtures, the cement content was set at 300 kg/m³ with water to cement (w/c) ratios ranging between 0.38 and 0.41.

Mechanical properties (compressive strength, flexural and indirect-tensile strengths) of RCC with RAP are analyzed and compared to RCC mixture made using 100% NA. The experimental results showed that as the percentage of RAP increases, the PCC mechanical properties decrease and it is possible to manufacture RCC with a maximum of 60% of RAP materials that has acceptable mechanical properties for rigid pavements.

To better understand the decrease of mechanical proprieties, microscopic observations were performed. Results confirmed the presence of the bitumen film, which coated aggregates and could affect consequently the adhesion between aggregates and cement mortar. These microscopic observations showed also that the hydration of cement proceeded in a normal manner with the presence of RAP particles with the formation of portlandite (C-H), calcium silicate hydrate (CSH) and ettringite in the form of well-compacted needles.

Finally, we have highlighted the effect of the bituminous mastic film by adopting the hyperbolic prediction model of compressive strength proposed by De Larrard *et al.*, which has confirmed that the adhesion between aggregates and cement mortar in the interfacial transition zone decreases with the presence of the bitumen film coating RAP aggregates.

1. Introduction

Le BCR est un béton composé des mêmes ingrédients qu'un béton conventionnel (granulats, ciment, eau, adjuvants et ajouts cimentaires éventuels), mais selon des proportions différentes car il s'agit d'obtenir un mélange sans affaissement. Sa mise en place nécessite alors l'apport d'une énergie de compactage importante pour atteindre la compacité désirée. Comparé au béton ordinaire, le BCR présente divers avantages : c'est un matériau mécaniquement performant, de prix concurrentiel, ayant une bonne capacité portante et une grande durabilité (Gauthier *et al.*, 2000 ; Ouellet, 1998 ; Zdiri, 2008).

Pour limiter son empreinte environnementale, l'utilisation dans son squelette granulaire de matériaux recyclés provenant de la déconstruction des anciennes chaussées (fraisâts d'enrobés) est devenue une voie intéressante.

Plusieurs équipes de recherche à travers le monde se sont intéressées à la valorisation des granulats d'enrobés recyclés dans le béton hydraulique et en particulier dans le béton compacté au rouleau (BCR) et ce en étudiant l'influence de l'introduction de ce matériau sur les propriétés mécaniques du béton et en particulier la résistance à la compression (Courard *et al.*, 2010 ; Delhez *et al.*, 2004 ; Sachet, 2012), la résistance à la flexion (Modarres et Hosseini, 2014) et le module élastique (Sachet, 2012).

La première partie de cet article présente les résultats d'une étude expérimentale où plusieurs formulations de BCR avec différents taux d'ajout de fraisât ont été mises au point et testées mécaniquement. Ensuite, et afin de mieux appréhender et interpréter les résultats des essais mécaniques, des observations microscopiques ont été réalisées sur un BCR à base de fraisât, les résultats sont présentés et discutés dans la deuxième partie de l'article. Enfin, la dernière partie est relative à l'application du modèle de De Larrard, 2000 de prédiction de la résistance à la compression aux différentes formulations de BCR à base de fraisâts d'enrobés afin de comprendre ce qui se passe au niveau de l'auréole de transition fraisât/pâte de ciment en terme d'adhérence.

2. Étude expérimentale

2.1. Identification des matériaux

Le BCR est composé classiquement de granulats grossiers concassés (gravier) et de granulats moyens siliceux alluvionnaires (sable roulé). Cette étude s'intéresse à la valorisation des fraisâts d'enrobé dans la formulation du BCR et donc deux types de matériaux seront utilisés. Les granulats naturels utilisés sont : un gravillon 4/16 et un sable de concassage 0/5 provenant de la carrière de Djebel Ressay sise au nord de la Tunisie. Ce sable a été choisi à la place d'un sable siliceux alluvionnaire pour améliorer l'impact environnemental du BCR. Les granulats recyclés sont des fraisâts d'enrobé issus d'une ancienne couche de roulement d'une route nationale. Ce matériau a été criblé en deux fractions : « fraisât sable » (FS) étalée de 0 à 4 mm et fraisât gravillon (FG) de granulométrie allant de 4 à 16 mm.

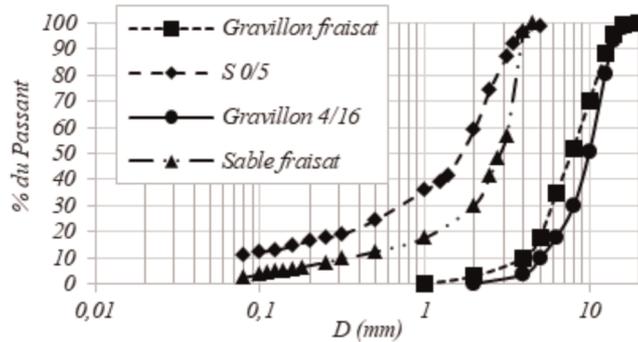


Figure 1. Courbes granulométriques des matériaux utilisés

Tableau 1. Caractéristiques des granulats utilisés

Caractéristique	G 4/16	S 0/5	FG	FS	Référence normative
Poids spécifique (g/cm^3)	2,7	2,69	2,45	2,49	NF EN 1097-6
Absorption (%)	0,78	0,62	0,3	0,3	
LA (%)	22,8	-	36,5	-	NF EN 1097-2
Compacité des granulats (< 80 μm)	0,629	0,717	0,607	0,62	-
Compacité des fillers (< 80 μm)	-	0,599	-	0,572	-

Les courbes granulométriques des granulats utilisés sont représentées dans la figure 1 et leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1. La mesure de la compacité Φ de l'empilement granulaire a été réalisée selon le procédé associé au Modèle d'Empilement Compressible (MEC) (Sedran et De Larrard, 2000) proposé par le Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (LCPC). La compacité des fillers calcaires a été déterminée par l'essai de demande en eau (Lecomte *et al.*, 2009).

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland de classe CEM I 42.5N produit par une cimenterie locale. Sa densité spécifique est égale à 3.11 et sa compacité est égale à 0,553.

2.2. Formules testées

Quatre formules incorporant différents taux d'ajout de fraisât allant de 0 à 100 % du volume total des granulats ont été mises au point afin de tester l'influence de ce déchet sur les différentes caractéristiques du BCR et de déterminer le pourcentage maximal de

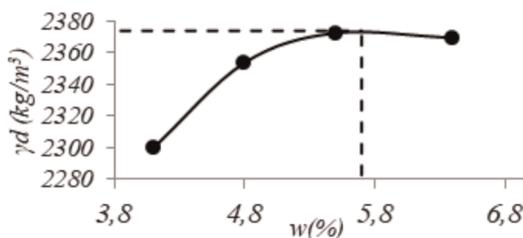


Figure 2. Courbe Proctor modifié

Tableau 2. Composition des formules testées

Formule	E/C	E (kg/m ³)	G4/16 (kg/m ³)	S 0/5 (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	FG (kg/m ³)
F0	0,38	114,6	1012	1006,6	-	-
F30	0,39	117,2	708,75	704,25	276,012	276,75
F60	0,4	119,7	405	402,42	552,024	553,5
F100	0,41	123,1	-	-	920,53	922,04

fraisât dans le BCR offrant des caractéristiques mécaniques satisfaisantes pour une application routière selon la norme NF P98-170 et qui sont [12] :

- une résistance à la compression minimale de 20 MPa à 28 jours ;
- une résistance à la traction par fendage minimale de 2 MPa à 28 jours.

La formulation du BCR témoin a été réalisée par l'intermédiaire du logiciel BétonLabPro2 (De Larrard *et al.*, 2000). Comme le BCR se comporte comme un sol humide à l'état frais, on a eu recours aussi à l'essai Proctor modifié et ce afin de déterminer la teneur en eau optimale qui permettra d'assurer un bon compactage sur chantier. La courbe Proctor obtenue est schématisée sur la figure 2.

Quant aux formules à base de fraisât, une substitution volumique des granulats neufs par les granulats d'enrobés recyclés (sable et gravier) a été appliquée. Pour tous les mélanges, le dosage en ciment a été fixé à 300 kg/m³. Le tableau 2 montre la composition des différentes formules testées.

Les éprouvettes ont été confectionnées par compactage en utilisant le procédé Proctor modifié qui correspond à une énergie de compactage assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur. Par la suite, elles ont été conservées dans l'eau.

2.3. Performances mécaniques du BCR à base de fraisât

Plusieurs essais ont été réalisés à différentes échéances afin de caractériser les formules étudiées à savoir l'essai de compression (figure 3a), l'essai de fendage



a. compression



b. fendage



c. flexion

Figure 3. Essais mécaniques réalisés

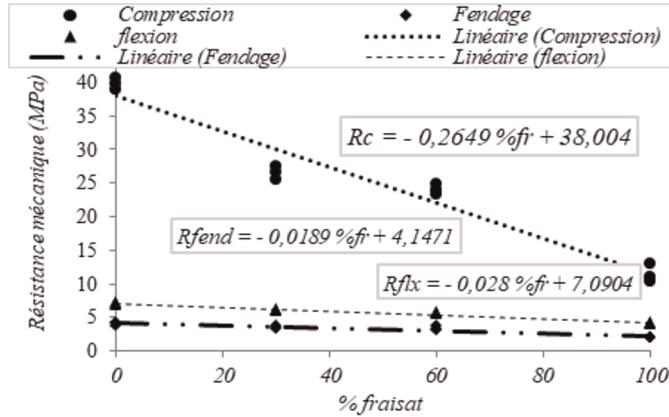


Figure 4. Variation des différentes résistances mécaniques à 28 jours en fonction du pourcentage de fraisât

(figure 3b) et l'essai de flexion trois points (figure 3c) conformément respectivement aux normes NF EN 12390-3 ; NF EN 12390-6 et NF EN 12390-5. Pour chaque propriété, trois éprouvettes ont été testées aux échéances propres à chaque essai.

Les résultats des différents essais mécaniques réalisés à 28 jours sont présentés sur la figure 4. Ces résultats montrent l'effet défavorable de la substitution des granulats neufs par du fraisât dans le BCR. L'ajout de ce déchet s'accompagne d'une diminution des différentes résistances mécaniques du BCR ce qui rejoint les résultats trouvés par plusieurs chercheurs (Courard *et al.*, 2010 ; Delhez *et al.*, 2004 ; Modarres et Hosseini, 2014 ; Sachet, 2012). La baisse des performances ne se fait toutefois pas de la même façon. En effet, les droites de tendance représentant la variation des résistances à la traction que se soit par fendage ou par flexion en fonction du pourcentage de fraisât présentent des pentes plus faibles que celle de la résistance à la compression. Ce constat est d'une grande importance pour ce nouveau type de béton destiné pour le corps de chaussée car les chaussées rigides travaillent principalement en flexion donc elles doivent résister aux contraintes de traction par flexion à la base de la couche rigide.

3. Étude de la microstructure

Pour bien comprendre la baisse des performances mécaniques du BCR à base de fraisât et vérifier que l'hydratation du ciment a eu lieu normalement en présence de ce granulat recyclé, une étude de la microstructure à travers des observations et des analyses par microscopie électronique a été menée.

La figure 5 montre la texture de deux formulations de BCR à base de 0 % fraisât (figure 5a) et à base de 100 % fraisât (figure 5b) observée sur section polie à l'aide d'un microscope optique à deux grossissements. Les phases présentes sont les granulats et la

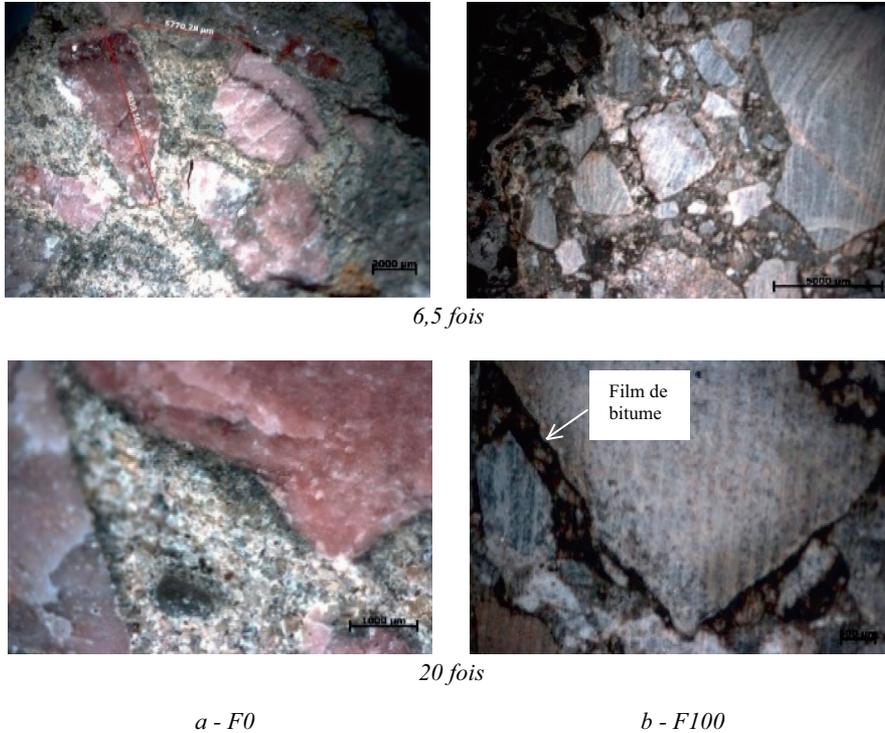


Figure 5. Observations avec microscope optique

pâte cimentaire durcie pour le BCR témoin. Pour le BCR de fraisât, on constate en plus la présence d'un mince film bitumineux autour des granulats et au sein d'autres granulats composites (figure 5b). Ce film de bitume peut, en effet, affecter l'adhérence granulat/pâte de ciment comme il sera montré plus tard.

Des observations et des analyses ont été aussi faites pour l'échantillon à base de 100 % d'agrégats d'enrobé avec un Microscope Électronique à Balayage (MEB) afin de vérifier la nature des phases hydratées et s'assurer par conséquent de l'hydratation du ciment. La figure 6 montre des investigations à échelle croissante. On distingue notamment :

- le granulat riche en calcite (figure 6a),
- la portlandite présente sous la forme hexagonale (figure 6b),
- la présence de minéraux filamenteux (figure 6c) de nature inconnue.

Une analyse au Microscope Électronique à Transmission (MET) a été effectuée à échelle nanométrique d'une zone riche en ces minéraux afin de les identifier. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de clichés photographiques (figure 7) et de

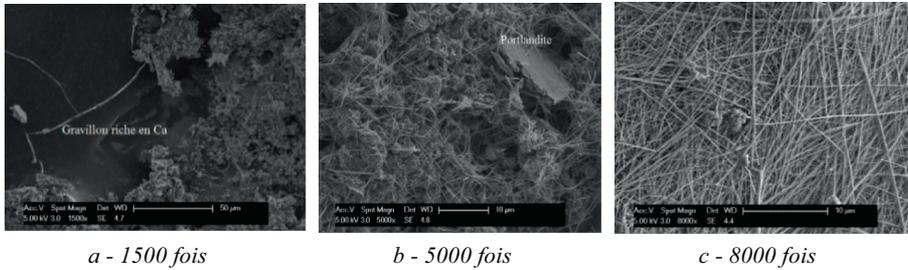


Figure 6. Observation au MEB de l'échantillon F100

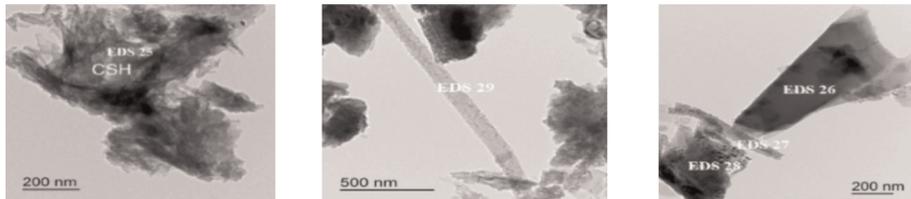


Figure 7. Observation au MET de l'échantillon F100

Tableau 3. Composition chimique de la zone riche en minéraux filamenteux

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO
1,56	10,84	5,98	12,5	0,66	68,46

compositions chimiques par des analyses dispersives en énergie (EDS) présentées dans le tableau 3. Ces analyses ont révélé que ce minéral était de l'ettringite et donc l'hydratation de ciment en présence de fraisât a eu lieu de la même façon que pour un béton ordinaire sans fraisât.

4. Application du modèle hyperbolique au cas de BCR de fraisât

Dans cette partie, on présentera tout d'abord le modèle utilisé qui présente la particularité de tenir compte de l'adhérence mortier-granulat pour un béton hydraulique. On présentera ensuite les résultats de la modélisation pour le cas de BCRs formulés totalement ou partiellement avec des fraisâts d'enrobés afin de voir l'influence de ce dernier sur cette adhérence.

4.1. Présentation du modèle

Dans ce modèle, le béton est assimilé à un matériau composite formé d'une phase rigide dure et inerte (le granulat) dispersé dans une matrice liante (la pâte de ciment), l'ensemble étant considéré comme homogène (De Larrard, 2000).

La résistance prévisionnelle à la compression du béton $f_c(t)$ est calculée par l'équation (1).

$$f_c(t) = \frac{pf_{cm}(t)}{qf_{cm}(t) + 1}, \quad (1)$$

dans laquelle :

– p et q sont deux paramètres fonction de la nature de la roche mère. Le paramètre p décrit la contribution de la liaison pâte/granulat à la résistance à la compression du béton et le paramètre q représente l'effet limitant, qui décrit la limitation de la résistance à la compression du béton par celle du granulat ;

– f_{cm} est la résistance de la matrice qui est préalablement calculée par l'équation (2) :

$$f_{cm}(t) = 13,4\sigma_{c28} \left[d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \frac{\sum Sfi_j f_{i_j}}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{e+a}{c} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13}. \quad (2)$$

Dans ce modèle, la contribution du ciment est prise en compte par la classe vraie à 28 jours σ_{c28} , par le dosage massique du ciment Portland (c) et par la masse volumique réelle du ciment (ρ_c).

f_{cm} dépend aussi des quantités volumique d'eau (e) et d'air occlus (a) ainsi que les paramètres cinétiques $d(t)$ (équation (3)) et $d(7)$ relatifs à la montée de la résistance dans le temps (t jours et 7 jours), Sfi_j la surface spécifique des fillers calcaires et f_{i_j} la masse des fillers calcaire ajoutés au ciment Portland et apportés par les granulats :

$$d(t) = 0,0522 \left(\frac{\sigma_c(t)}{\sigma_{c28}} - 1 \right), \quad (3)$$

C_{eq} étant la quantité de ciment équivalent. Elle est donnée par la relation (4) :

$$c_{eq}(t) = c \left[1 + 0,017t_{c3A} \left(1 - \exp \left(-79 \frac{\sum f_{i_j}}{c t_{c3A}} \right) \right) \right], \quad (4)$$

où t_{c3A} représente le taux d'aluminate tricalcique (C3A) du ciment Portland.

EMP est la distance entre deux gros grains. C'est une fonction de la dimension maximale des grains correspondant à 90 % de passants (D_{max}), du volume solide des

granulats (g) dans une unité de béton et de la compacité granulaire de l'empilement sec (g^*), donnée par la relation (5) :

$$EMP = D_{\max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right). \quad (5)$$

Si tous les paramètres de ce modèle sont déterminés avec soin, sa précision est en deçà de 2 à 3 MPa (De Larrard, 2000).

4.2. Application du modèle au cas du BCR de fraisât

Pour l'application de ce modèle au cas de BCR de fraisât, on a considéré le fraisât (composé de granulats enrobés d'un film mince de bitume) comme un nouveau granulats.

Pour la prédiction de la résistance en compression à travers le modèle décrit par l'équation (1) dans le cas de BCR incorporant des fraisâts, on a déterminé en premier lieu, la résistance à la compression de la matrice $f_{cm}(t)$ à travers l'équation (2) pour les différentes formules et à différentes échéances. L'EMP est déterminé en utilisant l'équation (5). Notons que la compacité optimale g^* est déterminée par l'intermédiaire du logiciel René-LCPC basé sur le modèle d'empilement compressible (Sedran et De Larrard, 2000) avec un indice de serrage de 12 relative au cas des BCR (De Larrard *et al.*, 2001).

Une fois $f_{cm}(t)$ est calculée et pour le calcul de $f_c(t)$, le modèle nécessite ensuite le calage du couple (p, q) pour chaque formule étudiée. Le calage de ces derniers a été réalisé par un outil d'optimisation numérique tout en minimisant la somme des écarts carrés entre les valeurs expérimentales et celles données par le modèle (méthode des moindres carrés) et en respectant les contraintes sur les valeurs de p et de q décrite par l'équation (6) :

$$0,5 \leq p \leq 1,2 \quad 0 \leq q \leq 0,006 \quad \text{et} \quad \frac{p}{q} = 2,14 * f_{cg}, \quad (6)$$

où f_{cg} caractérisant la résistance à la compression de la roche mère (Tourenq et Arquie, 1989) et déterminée par la relation (7) :

$$f_{cg} = \exp\left(\frac{133 - LA}{22}\right), \quad (7)$$

LA étant le coefficient Los Angeles de la roche mère des granulats.

Les résultats de la modélisation relatifs aux couples (p, q) des différents mélanges réalisés sont montrés dans le tableau 4. L'écart moyen absolu (la moyenne des écarts absolus entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le modèle) varie de 0,37 à 1,26 MPa.

Ensuite et afin de vérifier la pertinence du modèle, les valeurs de la résistance à la compression expérimentale en fonction de celles théoriques données par le modèle pour toutes les formules sont portées sur la figure 8. Sur la même figure est représentée la

Tableau 4. Résultat de la modélisation

Formule	F0	F30	F60	F100
p	0,822	0,592	0,548	0,327
q (MPa ⁻¹)	0,00256	0,00232	0,00235	0,0019
Écart moyen absolu (MPa)	1,26	1,12	0,37	1,16

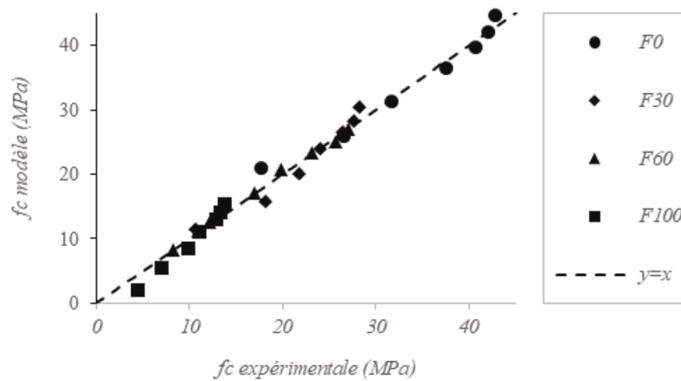


Figure 8. Résistance à la compression calculée par le modèle en fonction de celle expérimentale

droite bissectrice ($y=x$). Cette figure montre bien qu'on a une faible dispersion des résultats obtenus ce qui prouve la bonne prévisibilité du modèle de la résistance à la compression des BCR à base de 100 % de granulats naturels et des BCR à base de fraisât.

Enfin et afin d'étudier l'adhérence entre granulats et pâte de ciment, nous avons étudié la variation du coefficient « p », traduisant cette adhérence, en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât (figure 9). La valeur de « p » décroît rapidement en augmentant le taux d'ajout de fraisât ($\%fr$), en suivant l'équation (8) :

$$p = 0,8284 \exp(-0,009 * \%fr). \quad (8)$$

Ces résultats montrent bien l'effet défavorable de l'ajout du déchet dans la formulation du BCR sur l'adhérence pâte-granat. Notamment, plus le pourcentage de fraisât augmente, plus « p » diminue donc l'adhérence au niveau de l'auréole de transition entre les granulats et la pâte de ciment diminue. Pour le mélange à base de 100 % d'agrégat d'enrobé la valeur de p sort de l'intervalle des valeurs relatives au coefficient d'adhérence du matrice granulaire du béton ordinaire traduite par la relation (6). Cette réduction d'adhérence explique bien la diminution des résistances mécaniques du BCR en présence de granulats d'enrobés.

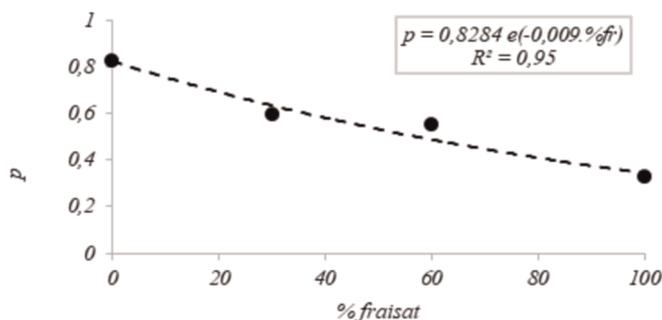


Figure 9. Variation de p en fonction du pourcentage de fraisât

5. Conclusion

Cette étude est une contribution à la valorisation des déchets routiers dans la formulation du BCR et qui a pour but de déterminer l'influence de l'ajout du fraisât sur les caractéristiques mécaniques du BCR. Les résultats obtenus ont montré :

- que le remplacement des granulats neufs par des fraisâts entraîne une diminution systématique des résistances mécaniques du béton : plus le dosage en fraisât est important, plus la diminution de résistance est importante ;

- qu'il est possible d'obtenir des performances mécaniques satisfaisantes ($R_{\text{compression}} > 20$ MPa et $R_{\text{traction}} > 2$ MPa) pour une application routière jusqu'à un taux de substitution de 60 % de fraisât ;

- que l'étude microscopique a bien confirmé la présence du film de mastic bitumineux enrobant les granulats, ce qui pourrait affecter l'adhérence granulat/pâte de ciment. Cette étude a montré également la présence de la portlandite, des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et particulièrement des ettringites sous formes d'aiguilles collées et bien compactées, ce qui prouvent qu'en présence de bitume (un matériau provenant des agrégats de fraisât) l'hydratation du ciment a eu lieu de façon normale ;

- que le modèle hyperbolique est bien applicable au cas du BCR à base de fraisât d'enrobés. Sa précision est au deçà de 1,26 MPa. En outre, l'application du modèle a confirmé que l'adhérence pâte de ciment/granulat dans l'auréole de transition diminue en présence du film bitumineux enrobant les granulats recyclés, et ce à travers le paramètre « p » du modèle décrivant cette adhérence. En effet, ce paramètre est négativement influencé par la présence de fraisât et en particulier par la présence du film de bitume enrobant le granulat recyclé qui a un effet négatif sur l'adhérence granulat/pâte et donc sur la résistance du BCR.

Bibliographie

Courard L., Michel F., Delhez P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n° 3, p. 390-395.

- De Larrard F., Sedran T. (2000). *BétonLabPro2. Une nouvelle approche de la formulation des bétons*, Logiciel de formulation des laboratoires des Ponts et Chaussées, France.
- De Larrard F. (2000). *Structure granulaires et formulation des bétons*, Étude et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, France, traduit de l'anglais par Lecomte A.
- De Larrard F., Marchand J., Pouliot N., Sedran T. (2001). Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire, *Bull. Lab. Ponts Chaussées*, vol. 4370, p. 23-36.
- Delhez P., Willem X., Michel F., Courard L. (2004). Use of concrete recycled aggregates in roller compacted concrete, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelone, Espagne, p. 675-683.
- Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E., Pigeon M. (2000). *Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtements en béton compacté au rouleau*, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, université de Laval, Canada.
- Lecomte A., Mechling J.M., Diliberto-Jeannot C. (2009). Compaction index of cement paste of normal consistency, *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n° 10, p. 3279-3286
- Modarres A., Hosseini Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material, *Constr. Building. Mater.*, vol. 64, p. 227-236
- Ouellet E. (1998). *Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau*, mastère en génie civil, université de Laval, Canada.
- Sachet T. (2012). *Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos*, thèse en génie civil, Université de PassoFundo Sao Paolo, Brasil.
- Sedran T., De Larrard F. (2000). *Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, version 6.1d, logiciel d'optimisation granulaire*, Note technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées, France.
- Tourenq C., Arquié G. (1989). *Granulats* Presse de l'École nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Zdiri M. (2008). *Étude de formulation et de comportement mécanique des bétons compactés au rouleau (BCR) : applications routières : cas des matériaux de gisements locaux*, thèse en génie civil, École nationale d'ingénieurs de Tunis.