

Application des méthodes d'empilement granulaire à la formulation des *Stones Matrix Asphalts (SMA)*

Daniel PERRATON *
Mathieu MEUNIER
Alan CARTER

Université du Québec,
Montréal (Québec), Canada

■ RÉSUMÉ

Au Québec, les écarts de température entre les saisons représentent des conditions sévères pour les enrobés bitumineux qui doivent être suffisamment déformables à basse température pour limiter les risques de fissuration thermique, tout en conservant une cohésion suffisante à haute température pour minimiser l'orniérage. Le *Stone Matrix Asphalt (SMA)* a pour objectif de répondre à ces besoins à l'aide d'un squelette granulaire particulier associé à un bitume modifié. Bien qu'à ce jour certaines méthodes de formulation aient été adaptées aux enrobés SMA, elles ne permettent pas de concilier le fait d'avoir un contact pierre-sur-pierre tout en optimisant leur facilité à être compactés. L'importance de la fraction intermédiaire sur la formulation des enrobés SMA est mise en évidence. En mettant en application les concepts associés aux combinaisons granulaires, une méthodologie de formulation pour cet enrobé a été élaborée. Il a été montré que l'on peut formuler des enrobés SMA en réduisant de façon significative la teneur en bitume. Les premiers résultats des essais de laboratoire laissent entrevoir une économie potentielle de près de 15 % en bitume. De plus, l'approche proposée permet d'atteindre plus rapidement la compacité de l'enrobé SMA.

Application of the methods of granular stacking up in the formulation of the *Stones Matrix Asphalts (SMA)*

■ ABSTRACT

In Quebec, temperature deviations from one season to the next create harsh conditions for asphalt mixes, which must retain enough deformability at low temperature to limit the risks of thermal cracking, while maintaining adequate cohesion at high temperature to minimize rutting. Stone Matrix Asphalt (SMA) has been designed to meet these needs thanks to a unique granular skeleton associated with a modified bitumen. Even though a number of mix design methods have already been adapted to SMA material applications, they still do not allow reconciling the fact of generating a stone-to-stone contact while optimizing compaction capability. The magnitude of the intermediate fraction in SMA mix design will be showcased herein. By applying the concepts associated with granular combinations, a design methodology for this mix category has been developed; it will be demonstrated that SMA mixes can be derived by substantially reducing bitumen content. The initial set of results from laboratory testing suggests a potential savings of nearly 15% bitumen. Moreover, the proposed approach enables reaching SMA mix compaction more quickly.

* AUTEUR À CONTACTER :

Daniel PERRATON
Daniel.Perraton@etsmtl.ca

INTRODUCTION

Au Québec, les écarts de température entre les saisons représentent des conditions sévères pour les enrobés bitumineux qui doivent être suffisamment déformables à basse température pour limiter les risques de fissuration thermique tout en conservant une cohésion suffisante à haute température pour minimiser l'orniérage. L'enrobé SMA (*Stone Matrix Asphalt*) ambitionne de répondre à ces

besoins à l'aide d'un squelette granulaire particulier associé à un bitume modifié. Ce type d'enrobé possède comme principale caractéristique un fuseau granulaire discontinu qui assure un contact pierre-sur-pierre entre les particules de la fraction grossière (taille ≥ 5 mm). Bien qu'à ce jour certaines méthodes de formulation aient été adaptées aux enrobés SMA, celles-ci ne permettent pas de concilier le fait d'avoir un contact pierre-sur-pierre tout en optimisant l'aptitude au compactage. En effet, la mise en œuvre d'enrobés SMA en milieu urbain peut dans certains cas s'avérer plus critique que pour des applications en milieu autoroutier. Une réflexion est proposée ici sur les méthodes de formulation adaptées aux enrobés SMA en considérant leur aptitude au compactage.

DÉFINITIONS

On appellera granulats un ensemble de particules, réservant ainsi la notion de grain à la description de la taille de la structure d'un minéral. Les particules peuvent être classées suivant leur dimension.

Au Canada, on désigne généralement par granulats fin les granulats dont la taille des particules est inférieure à 5 mm alors que ceux dont la taille est supérieure à 5 mm sont appelés gros granulats ou pierres (aux États-Unis on fait plutôt référence au tamis n° 4 : la dimension des mailles est de 4,75 mm).

Le terme « pierre », traduit en anglais par « *Stone* », est à l'origine de la désignation des SMA. La formulation de l'enrobé SMA vise à maximiser le contact pierre-sur-pierre du squelette granulaire. Dans cette étude, on introduit la notion de particules grossières, associées ici aux particules les plus grosses d'un gros granulats, au sein de la pierre.

Pour un mélange granulaire, on définit le volume des vides « V_v » (espace entre les grains) comme le volume constitué des interstices laissés entre chacune des particules du granulats. La porosité (n) représente le ratio du volume des vides au volume total alors que l'indice des vides (e) représente le ratio du volume des vides au volume des solides.

Enfin, la notion de mastic fait ici référence au mélange du bitume avec la fraction fine du squelette granulaire de l'enrobé (particules $< 80 \mu_{be}$). Dans le cas où des fibres sont incorporées à l'enrobé, celles-ci sont comptabilisées dans la phase mastic.

BREF HISTORIQUE DES SMA

Au début des années soixante, suite à l'apparition des pneumatiques « cloutés », les conditions des chaussées se dégradèrent très rapidement en Allemagne. À l'époque, cette nouvelle technologie, qui visait à accroître la sécurité des usagers de la route en conditions hivernales, s'est plutôt avérée problématique à cause de l'apparition d'ornières majeures [1].

Afin de corriger les dommages liés aux ornières et de se prémunir contre cette pathologie, Zichner [1] proposa un nouveau procédé fondé sur la mise en œuvre d'un « traitement mastic » dans lequel on insérerait une proportion importante de pierres concassées de bonne qualité. Le concept de l'enrobé SMA voyait le jour. De manière à assurer une application sur grande surface et à limiter les risques de séparation du « mastic » de la masse granulaire (*draindown*), Zichner proposa l'ajout de fibres d'amiante tout en fixant un rapport mastic/pierre de 30/70.

Les caractéristiques et les performances observées vis-à-vis de l'orniérage de l'enrobé SMA sont imputables au principe de base de cet enrobé : le contact pierre-sur-pierre [1-7]. La discontinuité du squelette granulaire associée à l'utilisation de granulats concassés fait en sorte que le niveau d'enchevêtrement des particules et le contact pierre-sur-pierre sont à leur plus haut niveau [8-10]. Le transfert des efforts au sein de la macrostructure d'un enrobé SMA, par l'entremise de la pierre, confère au mélange une bonne résistance à l'orniérage, dans la mesure où le mastic est de bonne qualité.

FORMULATION DES ENROBÉS SMA

L'Allemagne, le Danemark, les États-Unis, la Hongrie, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède et la Tchécoslovaquie se réfèrent à la méthode de formulation Marshall, avec quelques modifications propres à chacun d'eux, pour formuler les enrobés SMA [3, 8]. Malgré tout, aucune procédure de formulation spécifique n'est associée à ces enrobés. La principale modification consiste à fixer un fuseau granulaire en fonction de la grosseur nominale maximale (GNM) des granulats utilisés et à spécifier une teneur minimale en bitume. De fait, pour la plupart des pays, des différences existent, non pas sur la méthode de formulation mais plutôt en ce qui a trait à la préparation, la confection et la mise en œuvre de ces enrobés.

Au cours de la dernière décennie, une nouvelle approche de formulation spécifiquement adaptée aux enrobés SMA et utilisant la presse à cisaillement giratoire (PCG) a été développée aux États-Unis par le *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) [11]. Créé en 1986 à l'université d'Auburn en Alabama, le NCAT est un des cinq centres Superpave qui ont été créés aux États-Unis pour la recherche dans le domaine des enrobés bitumineux et la formation de personnel qualifié.

Le NCAT a défini des fuseaux granulaires pour différentes GNM de granulat pour lesquels la granulométrie est relativement uniforme et discontinue (tableau 1). Le NCAT propose des granulométries visant à se soustraire au desserrement (*dilation disrupts*) de la pierre, lequel conduit à une perte de résistance à l'orniérage de l'enrobé SMA [12, 13]. Selon la méthodologie proposée, la sélection de la combinaison granulaire optimale pour le SMA est fondée sur une approche volumétrique et vise une valeur minimale de vides intergranulaires de 17 % (*Voids in the mineral aggregate* : VAM $\geq 17\%$). Suivant la granulométrie spécifiée, la méthode du NCAT s'assure du contact pierre-sur-pierre du squelette granulaire de l'enrobé en vérifiant que la porosité de la combinaison granulaire associée à la pierre demeure inférieure à celle de la pierre seule. Cette dernière est établie à partir d'une mesure en laboratoire de la masse volumique sèche de la pierre (norme AASHTO T19). Le NCAT associe la notion de pierre à un tamis de contrôle suivant la GNM du squelette granulaire utilisé pour formuler l'enrobé SMA (tableau 1). Pour fixer le tamis de contrôle dans la formulation d'un enrobé SMA avec une GNM supérieure à 10 mm, le NCAT fait référence à la norme ASTM D-8, qui définit la « pierre » d'un granulat comme étant l'ensemble des particules dont la taille est supérieure à 4,75 mm (tamis n° 4).

tableau 1

Tamis de contrôle en fonction du GNM (1) de l'enrobé [11].

GNM	Tamis de contrôle (mm)	Fraction passante (% volumique)										
		37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,60 mm	0,30 mm	0,075 mm
25 mm	4,75	100	90-100	30-86	26-63	24-52	20-28	16-24	13-21	12-18	12-15	8-10
19 mm			100	90-100	50-74	25-60	20-28	16-24	13-21	12-18	12-15	8-10
12,5 mm				100	90-100	26-78	20-28	16-24	13-21	12-18	12-15	8-10
9,5 mm	2,36				100	90-100	26-60	20-28	13-21	12-18	12-15	8-10
4,75 mm	1,18					100	90-100	28-65	22-36	18-28	15-22	12-15

(1) L'acronyme équivalent en anglais pour GNM est : NMAS (*Nominal Maximum Aggregate Size*).

Scherocman et Tighe [14] font ressortir plusieurs points intéressants concernant cette méthode de formulation. Ils soulignent notamment qu'il n'est pas réaliste de spécifier la valeur minimale du VMA tout en fixant celle de la teneur en bitume. Il est clair que certaines combinaisons granulaires permettent d'atteindre une plus grande compacité de l'enrobé ($VMA < 17\%$) et une bonne performance sur route.

VARIATION DU DOSAGE EN BITUME DES ENROBÉS SMA EN FONCTION DE LA GNM

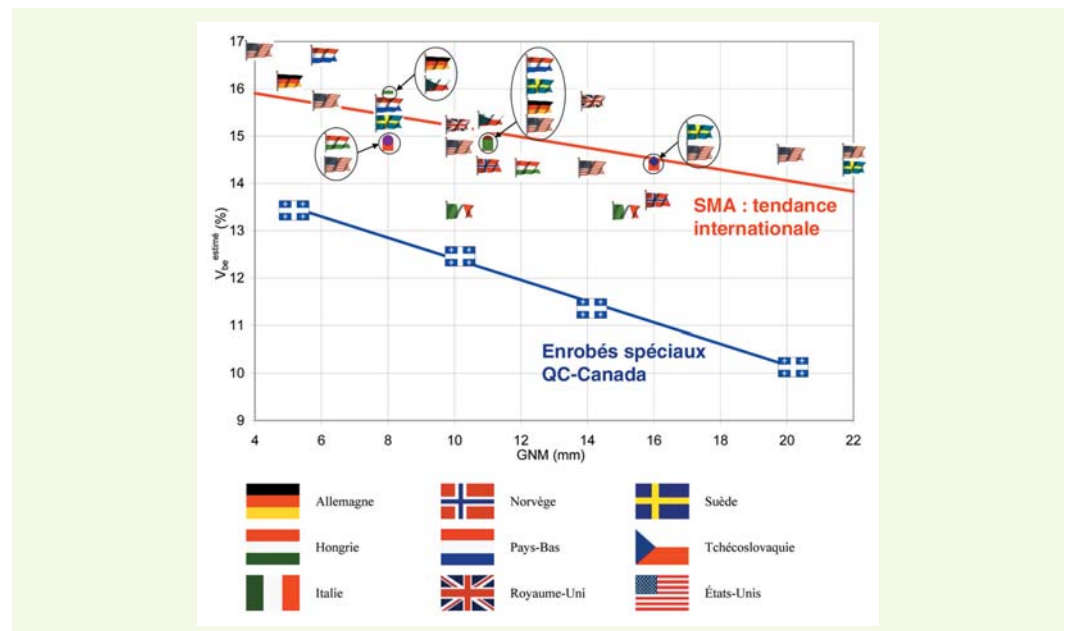
Afin de comparer la teneur en bitume des enrobés spéciaux confectionnés au Québec à celle des différents types de SMA produits à l'échelle internationale, on a cherché à préciser la teneur en

volume de bitume effectif (V_{be}). La notion de V_{be} représente le volume total de bitume (V_b) dans l'enrobé moins le volume de bitume absorbé (V_{ba}) par les granulats. Le V_{be} est exprimé en pourcent par rapport au volume de l'enrobé sans vide interstitiel (V_{mm}).

La notion de V_{be} a été introduite par les responsables du Laboratoire des chaussées (LC) du ministère des Transports du Québec (MTQ) au début des années quatre-vingt-dix. Elle représente actuellement une exigence au Québec quant à la confection d'enrobés soumis à une circulation importante de poids lourds (enrobés spéciaux), formulés selon la méthode LC du MTQ. Elle vise à assurer un enrobage minimal des particules par le bitume et une bonne durabilité de l'enrobé.

En vue de cerner les différents dosages de bitume effectif utilisés dans la confection des enrobés SMA produits dans divers pays, les teneurs en bitume spécifiées pour la confection d'enrobés SMA ont été d'abord répertoriées suivant les différentes classes de GNM. Ensuite, en considérant un taux d'absorption de bitume de 0,5 % pour une densité brute (d_{gb}) d'un combiné granulaire de 2,700, les différents volumes de bitume effectif correspondants ($V_{be}^{estimé}$) ont été calculés. La relation entre le $V_{be}^{estimé}$ et la GNM pour les différents enrobés SMA produits au niveau international et les enrobés spéciaux normalisés au Québec est présentée sur la **figure 1**.

figure 1
Relation entre le $V_{be}^{estimé}$ et la grosseur nominale maximale (GNM) du gros granulat pour les différents enrobés SMA produit au niveau international (d'après [3]).



Globalement, on constate que le $V_{be}^{estimé}$ utilisé pour la confection d'enrobés SMA est nettement plus important que celui requis pour les enrobés spéciaux couramment utilisés au Québec : en moyenne, pour une GNM donnée, un surplus de près de 15 % de bitume est requis pour la confection d'un enrobé SMA comparativement aux dosages usuels pour la confection d'enrobés spéciaux. Cet écart a une incidence directe sur le coût de base des enrobés SMA. Par ailleurs, on constate que, plus la GNM est faible, plus le V_{be} requis pour la confection de l'enrobé est important. La surface spécifique diminuant avec une augmentation du diamètre des granulates, une quantité inférieure de bitume est donc nécessaire pour enrober adéquatement chacune des particules.

OPTIMISATION DE LA GRANULOMÉTRIE EN FONCTION DE L'APTITUDE AU COMPACTAGE : CONCEPTS DE BASE ASSOCIÉS AUX COMBINAISONS GRANULAIRES

Selon l'application visée (couche de roulement, couche de base, chape d'étanchéité, autres), la GNM du gros granulat de l'enrobé varie de 5 à 28 mm. Dans le cas d'un matériau granulaire non

cohésif, un mélange contenant des granulats ronds et à granulométrie uniforme est plus facile à compacter qu'un mélange contenant des particules à granulométrie étalée et anguleuses. En comptant sur une stabilité à l'orniérage issue de l'effet couplé de la forme des particules (angulaire : concassée) et du contact entre les particules grossières du squelette, on compte optimiser l'aptitude au compactage de l'enrobé en maximisant la fraction grossière. Il est important de souligner que la notion de particules grossières, associée ici aux particules les plus grosses du granulat, se distingue de la notion de pierre associée aux particules de taille supérieure à 4,75 mm.

En définitive, on part du principe qu'un agencement granulaire uniforme atteint rapidement sa compacité maximale même si celle-ci n'est pas optimale. La teneur en vides résiduelle est alors comblée par les fractions intermédiaire et fine qui ne doivent pas interférer sur l'agencement des grosses particules. Dans ce contexte, la compaction de ces enrobés vise en définitive l'atteinte du contact « gros-sur-gros » plutôt que la densification proprement dite des enrobés.

Une réflexion a été conduite en vue d'évaluer la possibilité de formuler des enrobés résistant à l'orniérage et présentant une aptitude au compactage améliorée en prenant en considération l'interaction des particules au sein du squelette granulaire.

■ Notions fondamentales associées aux combinaisons granulaires

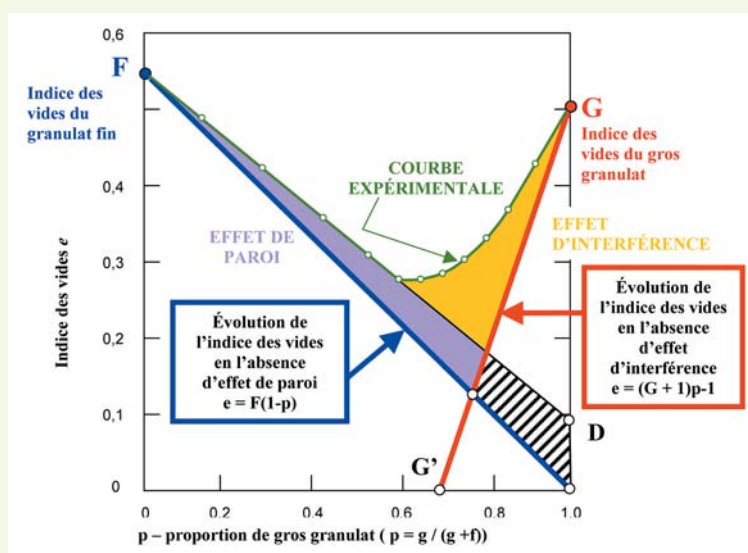
Lorsque l'on remplit un récipient avec un granulat ou un mélange granulaire, une partie seulement du volume est prise par les particules (les solides), l'autre partie étant constituée des interstices. À cet effet, il est intéressant de rappeler que, pour un milieu infini, l'indice des vides (e) d'un granulat constitué de particules unidimensionnelles est, à toute fin pratique, indépendant de la taille de la particule [15].

En étudiant la porosité de mélanges constitués à partir de deux granulats de taille unidimensionnelle différente, Caquot [16] a mis en relief l'importance sur l'indice des vides de deux types d'interaction entre les particules : l'effet de paroi et l'effet d'interférence.

L'effet de paroi est lié à l'interaction entre les particules et tout type de paroi (tuyau, coffrage, etc.) mis en contact avec la masse granulaire. Prenons le cas du mélange de deux granulats uniformes différant par la dimension moyenne de leurs particules, soit un gros granulat et un granulat fin. Lorsque l'on ajoute quelques particules du gros granulat au sein d'un volume infini du granulat fin, les particules grossières perturbent localement, à l'interface, l'arrangement de fines dont la porosité augmente (l'indice des vides augmente). Cette augmentation de porosité est proportionnelle à la surface des particules du gros granulat incorporé. La figure 2 montre l'effet de paroi sur l'indice des vides d'un combiné granulaire (aire en mauve) lorsqu'on augmente la fraction grossière au sein du granulat fin d'un mélange binaire.

figure 2

Représentation de l'effet de paroi et d'interférence (d'après Powers [17]) -
 f : volume solide du granulat fin ;
 g : volume solide du gros granulat ($f + g = 1$) ;
 F : indice des vides du granulat fin ;
 G : indice des vides du gros granulat.



Lorsque l'on continue à augmenter la proportion de gros granulat au sein du granulat fin, il arrive un moment où une certaine quantité des petites particules se trouve emprisonnée dans les interstices délimités par les particules grossières. De ce fait, au-delà de l'effet de paroi, l'indice des vides du granulat fin augmente par interférence : l'agencement des petites particules dépendra non seulement des aires des parois des particules grossières (effet de paroi) mais également de la disposition propre de ces dernières, c'est-à-dire de la forme de leurs interstices. On peut également illustrer la notion d'interférence en pensant à l'effet produit par l'introduction de quelques particules du granulat fin au sein d'un volume infini du gros granulat. Au fur et à mesure que l'on augmente la proportion du granulat fin, il arrive un moment où l'on force l'écartement des particules grossières du gros granulat par desserrement, modifiant ainsi leur agencement spatial : il y a interférence. La zone en jaune de la **figure 2** montre l'effet d'interférence sur l'indice des vides d'un combiné granulaire binaire.

Dans le cas où la dimension moyenne des particules du granulat fin (d_{FIN}) est suffisamment petite devant la dimension moyenne des particules du gros granulat (d_{GROS}), lorsque le rapport ($d_{\text{FIN}}/d_{\text{GROS}}$) est inférieur à 0,1 par exemple, l'effet de paroi est linéaire et satisfait au principe de superposition : l'effet de deux parois est la somme des effets de chacune des parois [18]. Par contre, l'effet d'interférence n'est jamais linéaire et, en conséquent, se prête difficilement à simplification [18].

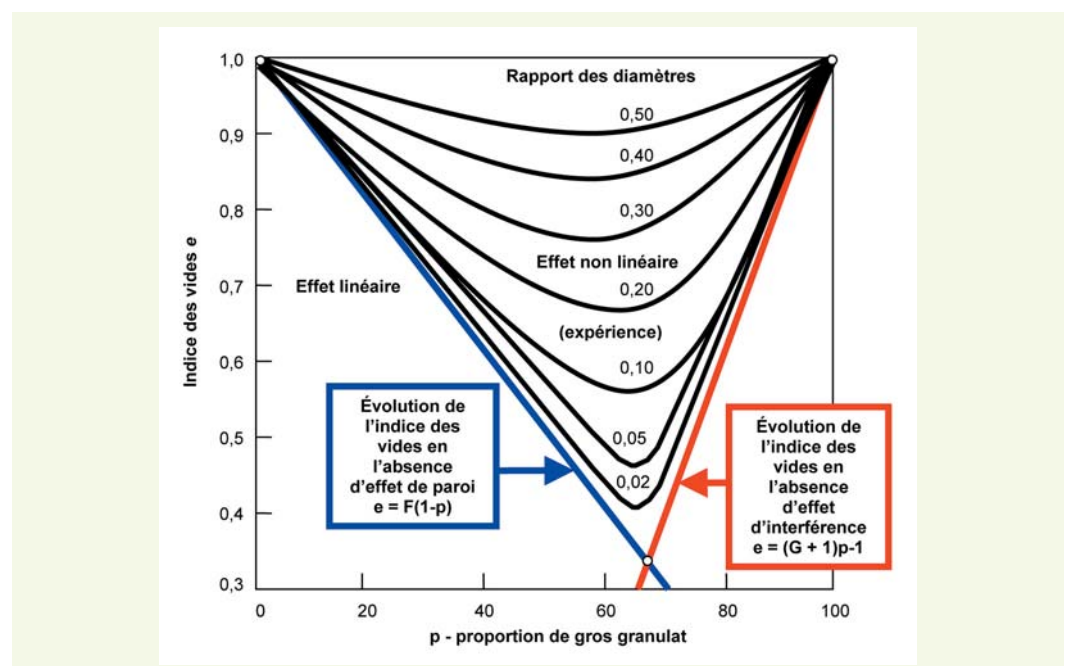
■ Évolution de la porosité d'un granulat suivant la dimension moyenne de ses particules

Powers [17] souligne que Furnas a montré que l'évolution de l'indice des vides (e) en fonction de la proportion de gros granulat dans un combiné binaire unidimensionnel dépendait du rapport des dimensions moyennes des particules. Les résultats présentés sur la **figure 3**, tirée des travaux de Furnas, montrent que plus le rapport de la dimension moyenne du granulat fin à celle du gros granulat est grand, plus les effets d'interaction sont significatifs.

Pour minimiser leurs interactions sur les particules grossières dans l'enrobé bitumineux, il convient de limiter la taille et le dosage de la fraction des particules intermédiaires et de combler les vides par une fraction plus importante de particules fines. Soulignons qu'il a été démontré expérimentalement que le volume minimal des vides d'un mélange granulaire dépend surtout du rapport entre la dimension du plus gros granulat à celle du plus fin et que l'échelonnement des dimensions intermédiaires a peu d'influence [18].

figure 3

Évolution de l'indice des vides selon Furnas établie sur un combiné binaire gros (g) et fin (f) en fonction de la proportion de gros granulat dans le combiné pour divers rapports des diamètres ($d_{\text{GROS}}/d_{\text{FIN}}$) (d'après [17]).



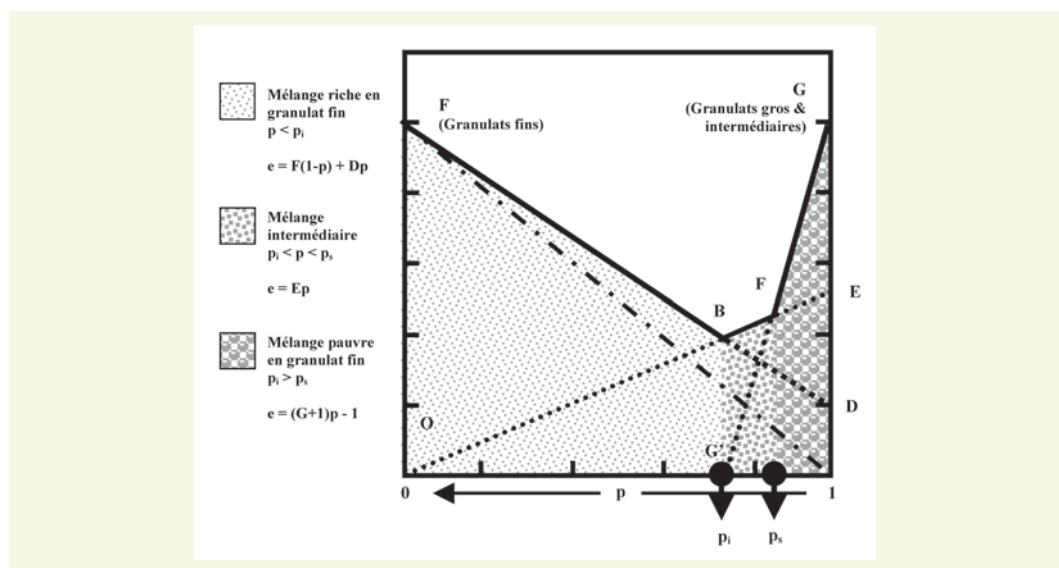
■ Mélange d'un granulat très fin avec un granulat grossier

Lorsqu'un granulat est très fin par rapport à l'autre ($d_{\text{FIN}}/d_{\text{GROS}} \sim 0,008$), Baron [18] propose de décrire la variation de l'indice des vides d'un mélange par trois droites (figure 4). Ce cas est intéressant puisqu'il correspond au mélange du filler ($d_{\text{Filler}} < 80 \mu\text{m}$) à un squelette granulaire grossier uniforme, comme dans le cas des enrobés SMA.

L'approche de Baron permet de définir deux seuils, p_i et p_s , qui renseignent sur les dosages critiques afin de se soustraire aux effets d'interférence. Dans un mélange binaire (gros et fin), le seuil p_i correspond au dosage maximal de gros granulat que l'on peut combiner au granulat fin pour ne pas nuire à l'agencement du granulat fin alors que le seuil p_s permet d'établir le dosage maximal de granulat fin $(1-p_s)$ à combiner au gros granulat pour ne pas interférer sur l'agencement des particules grossières.

figure 4

Variation de l'indice des vides dans le cas du mélange de 2 granulats dont l'un est très fin par rapport à l'autre (d'après [18]).



Selon que le mélange granulaire est riche en granulat fin, pauvre, ou intermédiaire, la variation de l'indice des vides du mélange peut être définie suivant trois lois différentes, soit :

- 1 **Mélange riche en granulat fin** $p < p_i \Rightarrow e = F(1-p) + Dp$ (1)
où F est l'indice des vides des fins et D est un coefficient de l'effet de paroi (figure 2).
- 2 **Mélange pauvre en granulat fin** $p > p_s \Rightarrow e = (G+1)p - 1$ (2)
où G est l'indice des vides des gros.
- 3 **Mélange intermédiaire** $p_i < p < p_s \Rightarrow e = Ep$ (3)
où E est un coefficient sans signification physique simple.

De manière à quantifier les seuils p_i et p_s , Baron [18] introduit la notion de « jeu » du granulat (j), laquelle fait référence à la notion de jeu dans un assemblage. Il suppose que toutes les particules d'un mélange sont de même forme, celle-ci pouvant être quelconque, et propose de quantifier la dimension d'une particule en équivalence au diamètre d'une sphère de même volume. En prenant la dimension moyenne des grosses particules comme étant égale à d_{GROS} et en considérant un volume total unitaire, constitué de N particules, on a :

$$g = \frac{p}{(1+e)} = \frac{\pi}{6} N d_{\text{GROS}}^3 \quad (4)$$

En imaginant la dilatation des grosses particules jusqu'à ce qu'elles soient en contact les unes avec les autres, on retrouve alors la structure des grosses particules, donc le même indice des vides (G) et le même volume absolu de grosses particules pour un volume apparent unitaire ($1/(1+G)$) [18]. Sachant que la dimension du gros granulat ainsi dilaté est ($d_{\text{GROS}} + j$), on peut écrire :

$$\frac{1}{(1+G)} = N \frac{\pi}{6} (d_{\text{GROS}} + j)^3 \quad (5)$$

En regroupant les équations (4) et (5), on obtient :

$$p = \left[\frac{(1+e) \cdot d_{\text{GROS}}^3}{(1+G) \cdot (d_{\text{GROS}} + j)^3} \right] \quad (6)$$

Il a été montré expérimentalement que l'interférence du gros granulat sur le granulat fin est jugée nulle lorsque le jeu du gros granulat au sein du mélange est de l'ordre de grandeur de la taille du granulat fin ($j = d_{\text{FIN}}$) [18]. En conséquence, la valeur de p correspondant au cas où j est pris égal à d_{FIN} représente la proportion limite de gros granulat que l'on peut mélanger au granulat fin sans qu'il interfère sur la structure de ce dernier : c'est le seuil p_i . Au point p_i , l'indice des vides est donné par l'équation (1) et on peut alors écrire :

$$p = \left[\frac{(1+F \cdot (1-p) + D \cdot p) \cdot d_{\text{GROS}}^3}{(1+G) \cdot (d_{\text{GROS}} + j)^3} \right] \quad (7)$$

Les réflexions évoquées par Caquot [16], les recherches menées par Furnas [17] et l'analyse proposée par Baron [18] montrent l'importance qu'il faut accorder à la fraction intermédiaire. Celle-ci peut non seulement nuire au contact entre les particules grossières par interférence mais, de surcroît, elle peut contribuer à accroître les vides du squelette granulaire, situation particulièrement critique au terme du dosage en bitume dans l'enrobé SMA. En conséquent, le choix et le dosage des particules intermédiaires demeurent particulièrement critiques.

MÉTHODOLOGIE DE FORMULATION PROPOSÉE POUR LA CONFECTION D'ENROBÉS SMA EN OPTIMISANT LE CONTACT GROS-SUR-GROS : SMA-CPACK¹

La méthodologie de formulation proposée se fonde sur les principes évoqués précédemment et sur l'application de la méthode de formulation LC du MTQ [19] qui normalise le V_{be} plutôt que de fixer une teneur en bitume. Les principales étapes sont :

- la détermination d'une combinaison granulaire optimale par mesure de l'indice des vides ;
- la sélection d'un V_{be} approprié suivant la GNM ciblée ;
- la détermination des proportions des constituants de l'enrobé sur une base volumétrique (formulation de départ).

Enfin, la formulation de départ est validée sur enrobé en laboratoire (PCG). Cette méthodologie se distingue des méthodes précédemment décrites du fait qu'elle ne cherche pas à fixer un fuseau granulaire mais plutôt à maximiser la fraction la plus grossière.

■ Détermination de la combinaison granulaire : dosages optimums

Pour arriver à sélectionner le plus simplement possible une combinaison granulaire optimale dans le but de maximiser la fraction grossière, il est proposé de départager l'ensemble du squelette gra-

¹ SMA-Cpack : Stone Mastic Asphalt with an optimal Coarse aggregate Packing.

nulaire suivant trois phases : les particules fines (filler : $d_{\text{filler}} \leq 80 \mu\text{m}$), les particules intermédiaires et les grosses particules. Les grosses particules représentent en fait la fraction granulaire assurant la continuité quant au transfert des efforts au sein de la macrostructure de l'enrobé : contact gros-sur-gros. Elles définissent en soi la GNM du granulat.

Afin d'améliorer l'aptitude au compactage, on propose de gérer le choix de la combinaison granulaire de manière à se soustraire à l'effet d'interférence de la fraction intermédiaire sur l'agencement de la fraction grossière. Pour éviter cette interférence, il faut impérativement limiter la dimension des particules intermédiaires en deçà d'une certaine valeur. Par référence aux travaux de Furnas (cf. [figure 3](#)), il est proposé de limiter *a priori* le rapport du diamètre des particules grossières (d_{GROS}) à celui des particules intermédiaires (d_{INT}) à 10 %.

À partir des sources de granulats disponibles et suivant la GNM de la classe de SMA à réaliser, on choisit la fraction grossière, le gros (g), et la fraction intermédiaire (i) en limitant la taille de cette dernière ($d_{\text{INT}} \leq 0,10 d_{\text{GROS}}$). À partir des granulométries (relativement uniformes), on calcule les diamètres moyens (d_{GROS} et d_{INT}) et, par essais de laboratoire, on détermine à la PCG² leur indice des vides correspondant (G et I). On détermine alors les dosages optimums à utiliser, en comparant la porosité de la combinaison gros-intermédiaire à celle anticipée en l'absence d'effet d'interférence (cf. [figures 2 et 3](#)). Le calcul de la masse volumique maximale (ρ_{GROS}) de la fraction grossière et sa porosité (n_{GROS}) permet de valider la qualité du contact gros-sur-gros dans l'enrobé. Dans le cas où la fraction intermédiaire est étalée, le calcul de d_{INT} est effectué en excluant la fraction passant le tamis de 80 μm , laquelle est comptabilisée dans la fraction fine.

Pour la fraction fine (f) ($< 80 \mu\text{m}$), le dosage en laboratoire doit être établi à partir du même matériau que l'on utilisera en production (mêmes proportions dans le cas d'un mélange). Il est impératif qu'elle demeure rigoureusement constante en cours de production. L'indice des vides des fins (F) est lui aussi établi à la PCG et le dosage optimal est établi en référence au mélange gros-intermédiaire.

En fonction de la GNM de l'enrobé à formuler, la séquence d'optimisation s'effectue en une étape ($\text{GNM} \leq 5 \text{ mm}$, soit le mélange de 2 fractions : fin et gros, la notion de gros faisant ici référence au GNM) ou en deux étapes ($\text{GNM} > 5 \text{ mm}$, soit le mélange de trois fractions : fin, intermédiaire et gros).

■ Détermination du V_{be} suivant la GNM spécifiée

Il est proposé de fixer la teneur en V_{be} de l'enrobé SMA suivant la GNM spécifiée. L'optimisation de la fraction grossière en limitant au maximum l'interférence de la fraction intermédiaire donne lieu à une macrostructure particulière de l'enrobé SMA. La méthodologie proposée conduit à une réduction du VAM et, « en conséquent » les valeurs de V_{be} correspondantes aux enrobés SMA conventionnels ne peuvent pas s'appliquer directement.

Afin d'apporter des éléments de réflexion quant au V_{be} optimal, Meunier [20] a conduit un programme d'essai sur des enrobés SMA conventionnels (SMA-10 ; GNM de 10 mm). Trois dosages en V_{be} ont été étudiés : 15,2 %, 15,8 % et 16,5 %. Des trois dosages étudiés, aucun ne s'est démarqué des autres en considérant les performances de l'enrobé vis-à-vis de l'orniérage, de l'essai de résistance à basse température (TSRST) et du coefficient de dilatation thermique. En conséquence, le dosage le plus faible demeure le choix le plus judicieux d'un point de vue économique.

En vue de cerner une valeur de référence du V_{be} , des essais en laboratoire sur un enrobé SMA formulé suivant l'approche proposée pour une GNM de 20 mm (SMA-Cpack 20) ont été effectués.

² Dans la perspective d'estimer des valeurs réalistes de l'indice des vides des granulats dans le contexte de l'enrobé, on mesure l'indice des vides du granulat à partir de la PCG. Bien qu'il puisse y avoir fragmentation des particules en cours d'essai, on a validé sur granulat seul que la masse volumique calculée après 60 girations était similaire à celle qui subsistait dans l'enrobé compacté à la PCG pour des granulats de bonne qualité et de forme relativement cubique.

Suivant la source de granulat considérée, il a été observé sur éprouvettes de PCG qu'un dosage en V_{be} du SMA-Cpack 20 supérieur à 9,9 % donnait lieu systématiquement à un excès de bitume (« saignement »), malgré l'utilisation de fibres de cellulose à des dosages usuels.

La relation proposée ici entre le V_{be} et la GNM se réfère au V_{be} établi pour le SMA-Cpack 20. Analytiquement, on peut estimer que la variation du V_{be} en fonction de la GNM du granulat se dessine autour de deux aspects : le changement de porosité du granulat lié à l'étendue granulaire et l'évolution de la surface spécifique du granulat. Pour quantifier cette variation du V_{be} en fonction de la GNM, il est proposé de départager le V_{be} suivant deux composantes :

$$V_{be} = V_{be}^{\text{Remplissage}} + V_{be}^{\text{Enrobage}} \quad (8)$$

La variation du $V_{be}^{\text{Remplissage}}$ est associée à la variation de la porosité du granulat liée à la variation de l'étendue granulaire alors que la variation du V_{be}^{Enrobage} est plutôt associée à la variation de la surface spécifique du granulat.

Pour des particules de forme arrondie, on peut admettre que la porosité dans un milieu infini (V_0) d'un granulat uniforme est de l'ordre de 0,36 [15]. Pour quantifier la variation du $V_{be}^{\text{Remplissage}}$, on propose

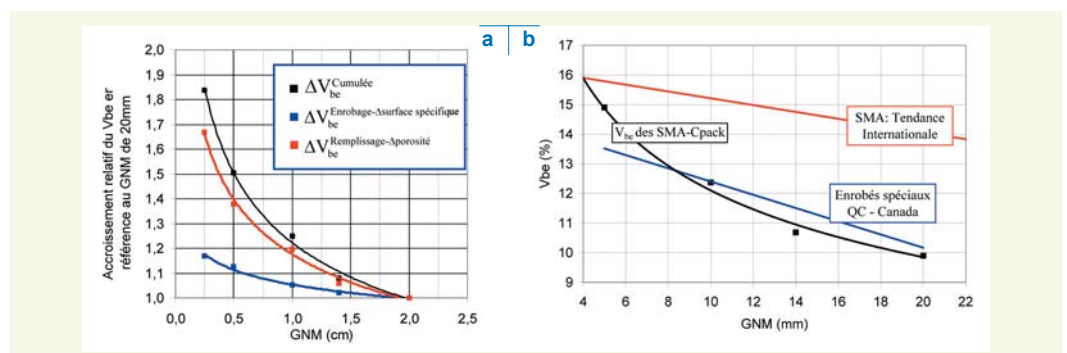
de se référer au modèle de Caquot ($V_v = V_0 [d_{\text{FIN}}/d_{\text{GROS}}]^{1/5}$). De plus, la variation du V_{be}^{Enrobage} est établie en considérant la variation de la surface spécifique de la fraction grossière en supposant que les grosses particules sont des sphères dont le diamètre moyen est défini par la GNM, augmentée de l'épaisseur d'un film constant de mastic d'enrobage (FME), soit $d_{\text{SPHERE}} = d_{\text{GROS}} + \text{FME}$.

En prenant en considération les deux phénomènes énoncés précédemment, l'augmentation relative au V_{be} de référence du V_{be} en fonction de la GNM a été quantifiée. La figure 5a présente la variation relative des deux composantes en fonction de la GNM alors que la figure 5b illustre les dosages en V_{be} identifiés *a priori* pour la confection des enrobés SMA-Cpack.

Il est important de souligner que le remplissage des interstices de la fraction grossière s'effectue à la fois par les fractions fine et intermédiaire et par le bitume. Pour combler ces interstices, pour un V_{be} donné, on peut envisager divers couples de dosage bitume-fin (bitume-filler), ce qui représente un élément puissant d'optimisation à exploiter. Le choix doit impérativement assurer une durabilité adéquate de l'enrobé en service (cisaillement, arrachement, tenue à l'eau...). Il est proposé d'optimiser les propriétés du mastic en contrôlant notamment le rapport volumique entre le granulat fin (filler) (V_f) et le bitume (V_b). À cet effet, il a été montré que l'on peut multiplier par un facteur de 5 à 10 le module complexe en cisaillement (10 °C-1 Hz) du mastic en agissant simplement sur la fraction solide du filler dans le mastic [21].

Bien qu'à ce stade aucun essai visant à cibler ces dosages optimaux n'ait été effectué, en se référant aux formulations d'enrobés SMA couramment utilisées, il a été considéré comme réaliste de fixer un ratio volumique de 1,0 ($V_b / V_f = 1,0$) pour des enrobés SMA-Cpack de GNM > 5 mm et un ratio volumique de 1,2 ($V_b / V_f = 1,2$) pour ceux dont la GNM serait ≤ 5 mm.

figure 5
Variation du V_{be} en fonction de la GNM du granulat :
a) Accroissement du V_{be} .
b) Variation proposée du V_{be} pour les SMA-Cpack.



■ Détermination des proportions de chacun des constituants de l'enrobé sur une base volumétrique : formulation de départ

En fixant *a priori* le V_{be} et le volume des vides dans l'enrobé (V_i), on peut déterminer en appliquant le concept des volumes absolus le dosage de chacun des constituants requis pour la formulation de départ. Sur la base d'un volume de référence (1 m³), le volume solide de granulat peut s'écrire :

$$V_{\text{SOLIDE DE GRANULAT}} (L) = 1\,000 - (V_{be}\% + V_i\% + V_f\%) \quad (9)$$

où V_f correspond au volume solide de fibres dans l'enrobé, lesquelles sont couramment utilisées dans les enrobés SMA pour limiter les risques d'égouttage (de saignement).

■ Exemple d'application pour l'optimisation du combiné granulaire d'une GNM de 20 mm : SMA-Cpack 20

Pour illustrer la méthodologie proposée, un exemple appliqué visant à déterminer les proportions optimales des granulats pour la confection d'un enrobé SMA-Cpack 20 pour la région de Montréal au Québec est illustré. Le **tableau 2** présente les caractéristiques des granulats disponibles dans la région. Tous ces granulats sont constitués de particules concassées.

tableau 2

Propriétés des granulats disponibles dans la région de Montréal au Québec et utilisés dans les enrobés SMA-Cpack (n/a : non applicable).

	Filler	Quartz 4010	Quartz 2075	2,5-5 mm	5-10 mm	10-14 mm	14-20 mm
Nature	Calcaire (Calco)	Silice (Unimin)	Silice (Unimin)	Calcaire (Raycar)	Calcaire (Bomix)	Calcaire (Bomix)	Calcaire (Bomix)
Classe	Filler	0/0,630	0,5/2,5	2,5-5	5-10	10-14	14-20
d_{gb}	2,770	2,620	2,620	2,828	2,649	2,699	2,705
d_{MOY} (mm)	0,034	0,365	1,240	3,240	6,484	12,130	16,029
Absorption à l'eau (%)	1,0	0,4	0,4	1,6	0,8	0,7	0,5
% particules plates	n/a	n/a	n/a	n/a	10,3	10,6	6,0
% particules allongées	n/a	n/a	n/a	n/a	37	20	6
Tamis (mm)	28	---	---	---	---	---	100
	20	---	---	---	---	---	94
	16	---	---	---	---	100	46
	14	---	---	---	---	84	18
	12,5	---	---	---	100	54	9,2
	10	---	---	100	95	4,0	5,5
	5	---	---	99	22	2,0	4,0
	2,5	---	100	16	0,3	2,0	0,0
	1,25	---	59	4,1	0,2	0,0	---
	0,630	---	98	2,3	0,2	---	---
	0,315	---	36	0,1	0,2	---	---
	0,160	100	5,4	0,0	0,1	---	---
	0,080	70	0,9	---	0,0	---	---

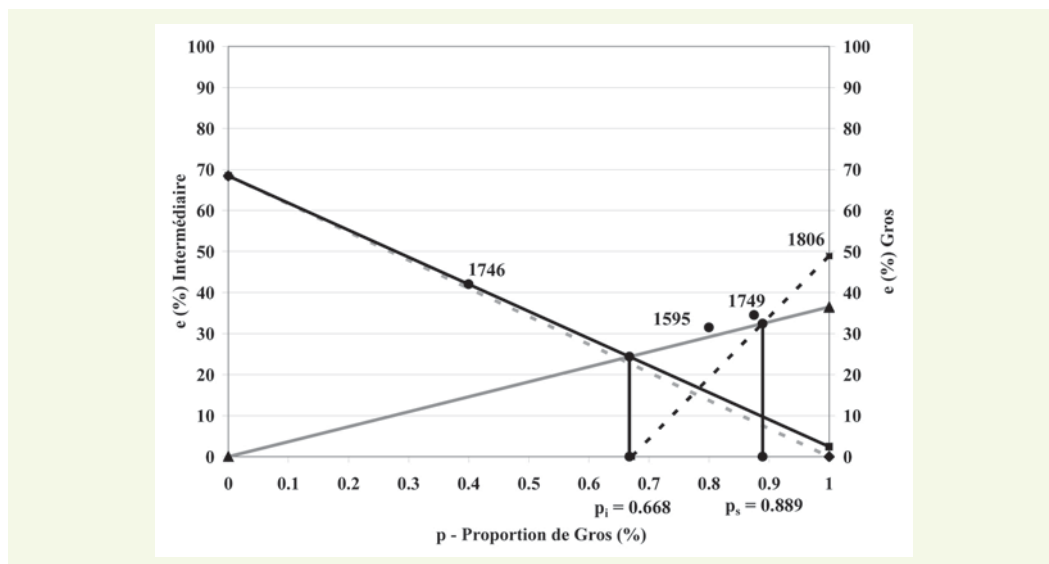
➤ Optimisation de la combinaison gros-intermédiaire

Il convient d'abord de définir les seuils p_i et p_s . Le seuil p_i est établi en quantifiant l'effet de paroi de l'interaction entre les particules intermédiaire et grossière. L'indice des vides d'un mélange solide de 40 % de gros combiné à 60 % d'intermédiaire permet de préciser le coefficient $D_{G/I}$ ($D_{G/I}$ correspond au coefficient D de l'équation (1) lorsqu'on mélange le gros et l'intermédiaire). La **figure 6** présente les résultats du mélange d'une classe granulaire 14/20 ($d_{GROS} = 16,0$ mm) avec une classe 0,5/2,5 ($d_{INT} = 1,2$ mm). En substituant la valeur I à F et en considérant que $j = d_{INT}$, l'équation (7) permet de déterminer le seuil p_i correspondant à ce mélange gros-intermédiaire ($p_i^{G/I}$).

La **figure 6** montre que la valeur de $p_i^{G/I}$ est égale à 0,668 pour le cas considéré, pour laquelle l'indice des vides est estimé à 24,4 %.

figure 6

Évolution de l'indice des vides du combiné binaire gros (g) et intermédiaire (i) de la proportion de gros ($p = g/(g + i)$), avec ($g + i = 1$) (les valeurs indiquées au-dessus de certains points correspondent à la masse volumique du gros (kg/m^3) dans le mélange).



À partir du point correspondant à (0,668 ; 24,4 %), on détermine le seuil de particules intermédiaires qui n'interfère pas sur la structure du gros, p_s . Ce point correspond au point d'intersection entre la droite représentant l'évolution de l'indice des vides en l'absence d'interférence (droite G-G' sur la **figure 4**) et celle définie par le point $p_i^{G/I}$ et passant par l'origine. La **figure 6** indique que la valeur de p_s est de l'ordre de 0,889, pour laquelle l'indice des vides correspondant serait de 32,5 %.

En définitive, le dosage en particules intermédiaires serait fixé à $(1 - p_s)$, soit à 11 %. Pour valider cette valeur, la mesure de l'indice des vides a été effectuée pour deux combinaisons distinctes gros-intermédiaire, soit : 89-11 et 78-22. Les résultats sont reportés sur la **figure 6**. Pour chacun des points correspondants à l'indice des vides de ces combinaisons, la masse volumique du gros correspondante au sein du mélange est indiquée. La masse volumique du gros du combiné 11-89 est légèrement inférieure (1 749 kg/m^3) à celle mesurée sur le gros seul (1 806 kg/m^3) indiquant ainsi un léger effet de desserrement des particules grossières induit par la présence des particules intermédiaires. Pour se soustraire encore plus à cet effet d'interférence, il y aurait lieu de réduire le dosage en particules intermédiaires (10-90 ou 8-92). Quoiqu'il en soit, la valeur du dosage gros-intermédiaire ciblée par le calcul de p_s , que l'on désigne ici par $p_s^{G/I}$, donne une valeur tout à fait probante et directe du dosage optimal de la fraction intermédiaire. Elle est donc retenue pour des fins de formulation en laboratoire.

➤ Optimisation de la combinaison gros-intermédiaire/fin

La combinaison gros-intermédiaire (G/I) sert de support pour le squelette granulaire dans la confection de l'enrobé SMA-Cpack 20. Pour fixer le dosage en particules fines (filler), le même principe s'applique : préciser le dosage en particules fines pour combler les interstices du combiné optimal gros-intermédiaire, toujours sans interférer sur l'agencement des gros. Le dosage en fin (filler) doit être inférieur à $(1 - p_s)$ du combiné ternaire gros-intermédiaire/fin ($p_s^{G/I-F}$).

Une série de mesures de l'indice des vides du combiné ternaire permet de cerner la valeur du seuil $p_s^{G/I-F}$. Les résultats de ces essais sur granulats seuls sont présentés sur la **figure 7**. L'indice des vides mesuré pour le combiné 0,4 (g/i) - 0,6f permet d'extrapoler la valeur de $D_{G/I-F}$ (valeur de D dans l'équation (1)) pour le mélange ternaire.

En considérant que $j = d_{\text{FIN}}$ (taille du filler) et que G correspond à l'indice des vides du combiné optimal gros-intermédiaire ($G/I = 32,4$ %), l'équation (7) permet de déterminer le seuil p_i ($p_i^{G/I-F}$), correspondant au mélange gros-intermédiaire/fin, à partir duquel on peut déterminer le seuil p_s ($p_s^{G/I-F}$). Tel qu'indiqué sur la **figure 7**, les valeurs des seuils $p_i^{G/I-F}$ et $p_s^{G/I-F}$ sont respectivement 0,839 et 0,867.

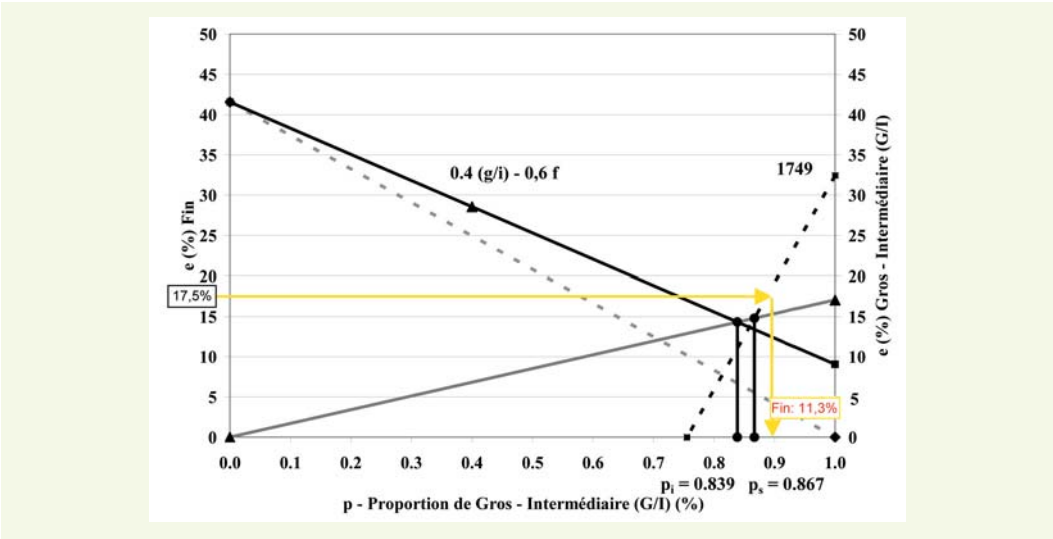
Le dosage en filler doit être inférieur à $(1 - p_s^{G/I-F})$, soit à 13 %. Ce dernier sera fixé en considérant le V_{be} que l'on souhaite avoir au sein de l'enrobé et la teneur en vides résiduelle recherchée (V_i) dans

l'enrobé. Pour l'exemple considéré, le V_{be} étant fixé à 9,9 % (99 ‰) et la teneur en vides résiduelle souhaitée à 5 % (50 ‰), on en déduit que la porosité du squelette granulaire (n) devrait se situer autour de 14,9 % ($n = [V_v/V_T] \cdot 100\% = [(V_{be} + V_i)/V_T] \cdot 100\% = [(99 + 50) / 1000] \cdot 100\%$). La **figure 7** donne la relation entre l'indice des vides du squelette granulaire en relation à la proportion de fin (filler) dans le mélange. On peut ainsi valider le dosage en fin du combiné granulaire, soit :

$$e\% = \left[\frac{n}{(1-n)} \right] \cdot 100\% \tag{10}$$

Pour la porosité ciblée (14,9 ‰), l'indice des vides correspondant serait de 17,5 ‰. À partir de la **figure 7**, on trouve alors que le dosage en fin (filler) devrait s'établir à 11,3 ‰.

figure 7
Évolution de l'indice des vides du combiné binaire gros-intermédiaire (« g/i ») et fin (f) en fonction de la proportion de gros-intermédiaire (« g/i ») ($p = \text{« g/i »} / \text{« g/i »} + f$), avec « g/i » + f = 1).



➤ Formulation de départ

Le **tableau 3** résume les principales proportions granulaires calculées suivant la méthode proposée et les proportions des constituants pour la confection d'un enrobé SMA-Cpack 20 en vue d'une validation à la PCG en laboratoire.

tableau 3
Proportion pour la confection de l'enrobé SMA-Cpack 20.

Proportion massique (%)	SMA-Cpack 20		
	1 ^{re} étape	2 ^e étape	Final
Combiné GROS-INTERMÉDIAIRE			
1. Intermédiaire	11,1		
2. Gros	88,9		
Combiné {GROS-INTERMÉDIAIRE} - FIN			
3. Fins (seuil maximal)		13,3	
4. {GROS-INTERMÉDIAIRE}		86,7	
FORMULATION MÉLANGE DÉPART (voir annexe I)			
5. Granulat intermédiaire			9,34
6. Gros granulat			75,20
7. Granulat fin			10,77
8. Fibres de cellulose			0,28
9. Bitume (V_{be} : 9,9 % ; M_{ba} : 0,55 %)			4,41

APPLICATION DE LA MÉTHODE DE FORMULATION DES ENROBÉS SMA-CPACK POUR 4 CLASSES DE GNM : 5, 10, 14 ET 20 MM

La méthode de formulation proposée a été appliquée à la confection d'enrobés SMA-Cpack de différentes GNM utilisant des matériaux disponibles dans la région de Montréal au Québec (cf. [tableau 2](#)). La [figure 8](#) présente schématiquement la macrostructure en coupes des enrobés confectionnés obtenue à partir d'imageries digitalisées. On constate que la teneur en particules grossières est importante pour chacun des enrobés SMA-Cpack. Le [tableau 4](#) résume les principales proportions des constituants de ces enrobés SMA-Cpack.

figure 8
Illustration de la proportion de gros granulats dans les SMA-Cpak.

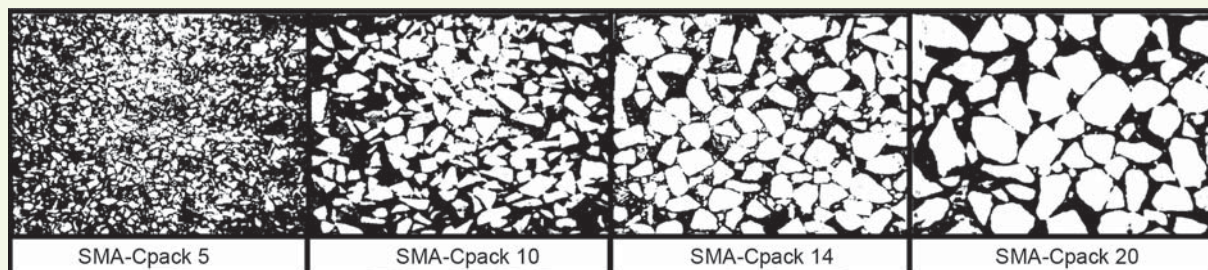


tableau 4
Principales proportions des constituants dans les enrobés SMA-Cpack.

		SMA 5	SMA 10	SMA 14	SMA 20
GNM (mm)		5	10	14	20
% Massique	Filler	18,9	17,5	16,0	12,8
	Quartz 2075	n/a	n/a	3,1	9,2
	Quartz 4010	n/a	8,7	n/a	n/a
	2,5-5 mm	74,8	n/a	n/a	n/a
	5-10 mm	n/a	68,0	n/a	n/a
	10-14 mm	n/a	n/a	76,1	n/a
	14-20 mm	n/a	n/a	n/a	73,8
	Fibre de cellulose	0,3	0,3	0,3	0,3
	Bitume (PG58-28)	6,0	5,6	4,5	4,0
% Volumique	V_i	3,2	2,3	1,9	2,6
	$V_F (< 80 \mu m)$	11,8	10,7	10,0	8,0
	$V_l (0,30V_F + V_i)$	5,0	12,6	7,2	12,1
	V_G	65,3	62,4	69,8	67,4
	V_{be}	14,7	12,4	11,2	9,9
	VAM	17,9	14,7	13,0	12,5
Film de bitume effectif : FBE (μm)		5,6	6,5	5,3	5,5
Film de mastic effectif : FME (μm)		75,7	65,5	75,8	66,4

■ Analyse des résultats

Pour analyser la performance des enrobés SMA-Cpack, des essais à la PCG et à l'ornièreur ont été réalisés. Par ailleurs, pour permettre une analyse comparative, les [tableaux 5](#) et [6](#) résument les principales caractéristiques des enrobés spéciaux du MTQ et celles des enrobés SMA développés par le NCAT.

tableau 5
Propriétés d'enrobés
spéciaux selon le MTQ.

Type d'enrobé	EG-5	ESG-10	ESG-14	GB-20
GNM (mm)	5	10	14	20
V_{be} (%)	13,5	12,2	11,4	10,2
VAM (%) minimum	17,0	15,0	14,0	13,0
Vides comblés par le bitume (VCB) (% du VAM)	Circulation faible	70-80	70-80	70-80
	Circulation moyenne	65-78	65-78	65-78
	Circulation forte	65-75	65-75	65-75
Ornières (%)	à 1 000 cycles	≤ 10	≤ 10	n/a
	à 3 000 cycles	≤ 20	≤ 20	n/a
	à 30 000 cycles	n/a	n/a	≤ 10

tableau 6
Propriétés des enrobés
SMA selon le NCAT.

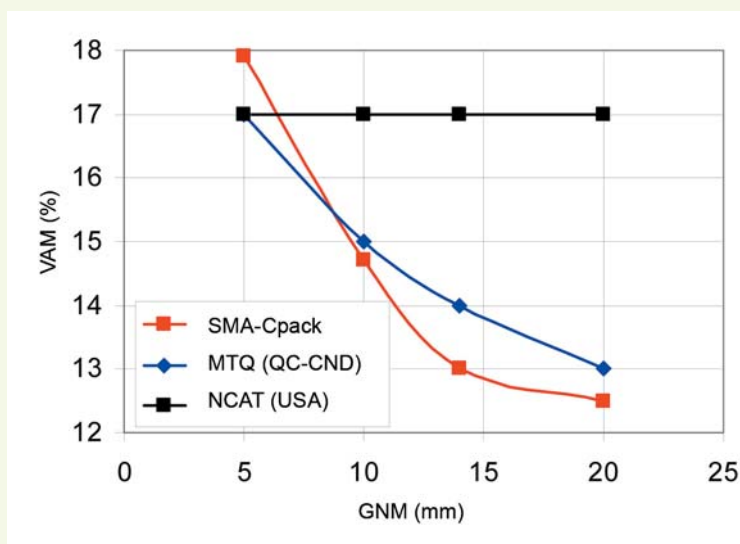
	Toute catégorie de GNM confondus
% de bitume	Fonction du d_{gb} de la combinaison granulaire
VAM (%) minimum	17,0
$VCA_{MELANGE}$	Inférieur au $VCA_{GROS\ GRANULAT\ SEC}$
% de vides au N_{design}	4
N_{design} (nombre de girations)	70

(1) Établie à 6,1 % pour un $d_{gb} = 2,700$.

► Vides du squelette minéral (voids in the mineral aggregate : VAM)

La variation des VAM en fonction de la GNM pour les enrobés SMA-Cpack (courbe pleine, (rouge)) et des enrobés spéciaux du MTQ (courbe pointillée, (bleue)) est présentée sur la **figure 9**. Les résultats montrent une similitude de comportement pour les deux types d'enrobés : le VAM varie en fonction de la GNM. Les résultats corroborent ainsi les observations de Scherocman et Tighe [14]. Il est à noter que la proportion de particules intermédiaires pour l'enrobé SMA-Cpack 10 n'est pas optimale puisque ce dernier possède des gros granulats ayant une quantité importante de particules allongées (37 % ; cf. **tableau 2**).

figure 9
Évolution des VAM (%)
pour différents enrobés.



› Dosage en bitume

Le **tableau 7** indique les dosages en bitume utilisés pour la confection des enrobés SMA-Cpack confectionnés en laboratoire ainsi que ceux correspondant aux enrobés spéciaux du MTQ et aux enrobés SMA formulés suivant la méthode du NCAT.

Les teneurs en bitume des SMA-Cpack formulés suivant l'optimisation du contact gros-sur-gros permettent une réduction substantielle des teneurs en bitume par rapport aux enrobés SMA conventionnels (réduction de 20 à 30 %). De surcroît, les teneurs en bitume des SMA-Cpack en fonction de la GNM s'avèrent même dans certains cas légèrement inférieures à celles des enrobés spéciaux couramment utilisés au Québec. Ces observations sont intéressantes puisqu'elles laissent entrevoir la possibilité d'une importante réduction du coût de production de ces enrobés.

tableau 7
Teneurs en bitume
exprimées par rapport à la
masse totale de l'enrobé.

		Teneur en bitume (%)			
GNM (mm)		5	10	14	20
Enrobés spéciaux du MTQ (QC-Canada)		5,9 ⁽¹⁾ (EG-5)	5,4 (ESG-10)	5,0 (ESG-14)	4,5 (GB-20)
SMA	NCAT (USA)	≥ 6,1 ⁽²⁾	≤ 6,1 ⁽²⁾	≤ 6,1 ⁽²⁾	≤ 6,1 ⁽²⁾
	SMA-Cpack	6,0	5,6	4,5	4,0
	International	≤ 7,2 ⁽³⁾	≤ 6,5 ⁽³⁾	6,5 à 7,5 ⁽⁴⁾	5,5 à 7,2 ⁽⁵⁾

(1) On admet que $V_i = 5\%$; $d_b = 1,015$; $d_{gb} = 2,700$ et $P_{ba} = 0,5\%$; (2) $d_{gb} = 2,700$; (3) Allemagne ; (4) Royaume Uni ; (5) Suède.

› Aptitude au compactage

L'aptitude au compactage est évaluée en laboratoire à partir de l'évolution des vides à l'essai de la PCG. On se réfère au nombre de girations de « design », le N_{design} , pour juger de l'aptitude au compactage de l'enrobé. Le N_{design} des enrobés normalisés au Québec est fixé selon la GNM alors que le N_{design} des enrobés SMA formulés selon les directives du NCAT est constant et fixé à 70.

Moutier [22] a proposé une relation entre le N_{design} et les conditions de mise en œuvre des enrobés sur chantier. Par l'intermédiaire d'un facteur d'efficacité (K), cette relation permet de prendre en compte les informations relatives à la mise en place et aux équipements de pose utilisés. Il propose une relation entre N_{design} , l'épaisseur de pose (e_{couche}) et le nombre de passes du compacteur (n_p) :

$$N_{\text{design}} = K * e_{\text{couche}} * n_p \quad (11)$$

Cette relation montre que, pour la mise en place d'une couche épaisse (GNM élevée), l'enrobé peut présenter une macrostructure qui requiert plus d'énergie au compactage à la PCG (N_{design} augmente) sans qu'un plus grand nombre de passes soit requis pour sa compaction sur route. En effet, en couche épaisse, l'efficacité du compactage est meilleure en raison d'une meilleure conservation de la chaleur dans l'enrobé en cours de compaction. La notion du N_{design} permet donc une bonne transposition laboratoire - chantier.

Suivant la méthode de formulation proposée, fondée sur l'optimisation du contact gros-sur-gros, le N_{design} spécifique à ces enrobés a été évalué. La **figure 10** présente l'évolution des vides de ces enrobés en cours de compaction à la PCG. Indépendamment de la GNM, cette figure montre que les enrobés SMA-Cpack atteignent rapidement la valeur cible de 4 à 7 % de vides, correspondant ainsi à des N_{design} faibles compris entre 25 et 60 girations. Dans l'ensemble, les valeurs du N_{design} des SMA-Cpack témoignent d'un gain appréciable au niveau de l'aptitude au compactage. L'agencement optimal des grosses particules est atteint très rapidement (N_{design} faible). Par la suite, la densification de l'enrobé est empêchée par le contact gros-sur-gros.

La variation observable sur les N_{design} des différents SMA-Cpack testés témoigne des différences entre les matières premières utilisées pour la confection de ces enrobés, les granulats utilisés pour les enrobés SMA-Cpack 14 étant constitués d'une fraction importante de particules allongées

(cf. **tableau 2**). Pour cet enrobé, en sélectionnant des granulats de forme plus homogène, il serait tout à fait réaliste de cibler des valeurs de N_{design} semblables à celles des autres enrobés SMA-Cpack. Dans le cadre de ce projet, on a choisi d'employer des granulats couramment utilisés dans la région de Montréal (Québec) sans chercher à les optimiser.

Le **tableau 8** regroupe les différentes valeurs cibles de N_{design} pour les enrobés SMA-Cpack, SMA-NCAT et les enrobés spéciaux mis en œuvre au Québec. À la lueur de ces résultats, on constate qu'il est tout à fait réaliste de cibler une valeur cible de N_{design} unique pour les enrobés SMA-Cpack, tel que proposé par le NCAT. Le concept de formulation proposé permet d'envisager une réduction de la valeur cible proposée par le NCAT de près de la moitié. Suivant l'approche de formulation proposée et en considérant la relation présentée par Moutier [22], on anticipe donc une réduction importante du nombre de passes du rouleau compacteur pour la mise en place des SMA-Cpack sur route.

figure 10
Évolution des vides à la
PCG des enrobés SMA-
Cpack.

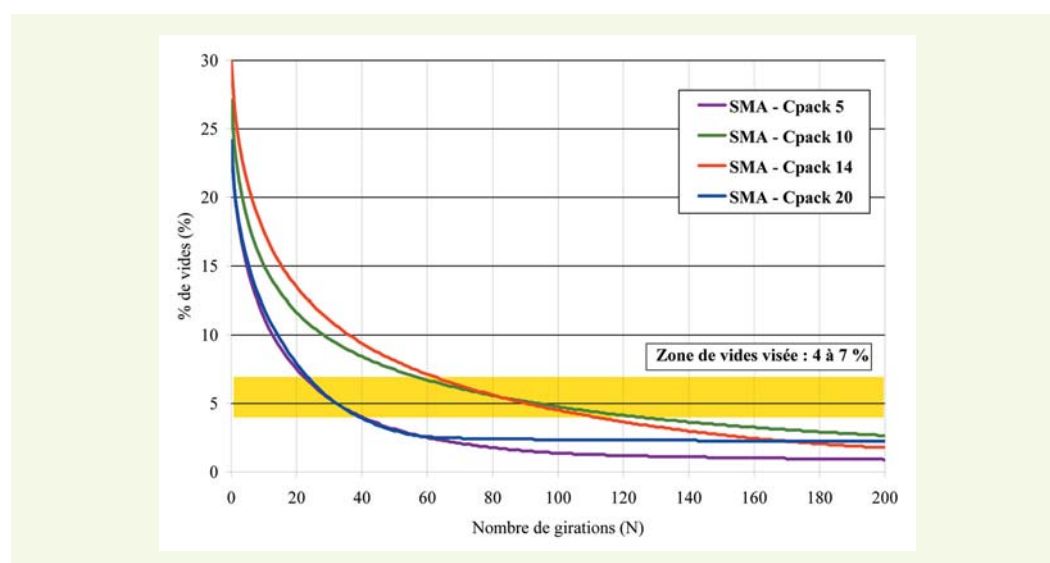


tableau 8
Valeurs de N_{design}

		N_{design}			
GNM (mm)		5	10	14	20
Enrobés spéciaux du MTQ (Qc-CDN)		50	80	100	120
SMA	NCAT (USA)	70	70	70	70
	SMA-Cpack	25	30	60	25

► Performance à l'ornièreur des SMA-Cpack

La performance à l'ornièrage des quatre formules d'enrobés SMA-Cpack a été évaluée à l'aide de l'ornièreur français de type MLPC. Les résultats de ces essais sont présentés sur la **figure 11** et dans le **tableau 9**.

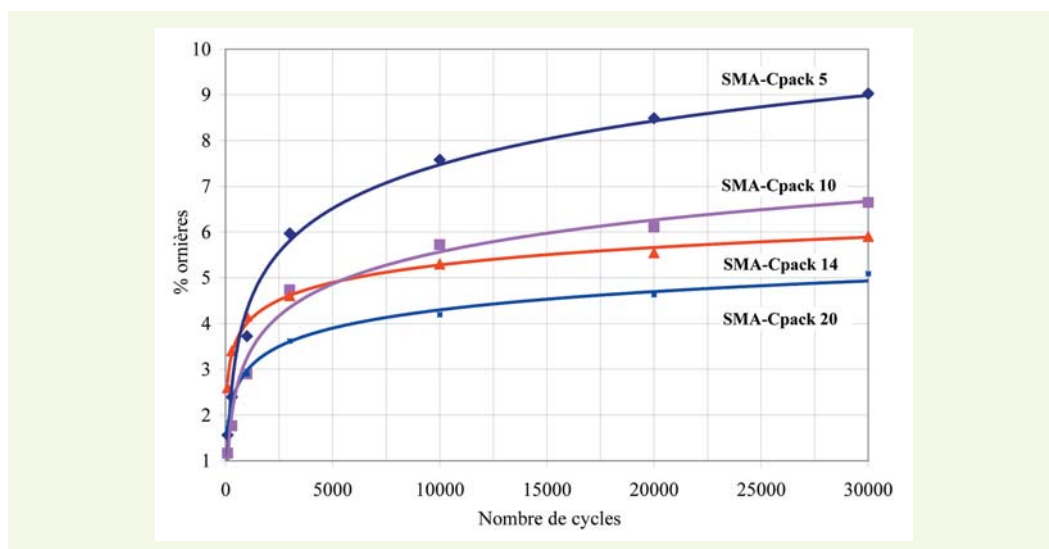
Compte tenu du fait que les enrobés SMA-Cpack ont été confectionnés à partir d'un bitume relativement mou (PG58-28), requis au Québec pour assurer une déformabilité suffisante de l'enrobé aux basses températures, les résultats de la **figure 11** montrent que la performance à l'ornièrage des enrobés SMA-Cpack est très bonne : le contact gros-sur-gros assure la stabilité vis-à-vis de l'ornièrage de ces enrobés.

Il est important de souligner qu'une macrostructure du type SMA-Cpack pourrait s'avérer très sensible aux variations de dosages des constituants en production. En effet, un excès de particules fines ou de bitume peut favoriser le desserrement des gros granulats et réduire ainsi la stabilité de l'enrobé. C'est pourquoi la formulation de ce type d'enrobé devrait impérativement prévoir un dosage en vides important afin de se prémunir contre toute fluctuation potentielle des dosages en cours de production.

tableau 9
Synthèse des résultats
à l'orniérage pour les
enrobés SMA-Cpack et
les exigences du MTQ en
fonction du GNM.

		Pourcentage d'ornières (%)			
GNM (mm)		5	10	14	20
Exigences MTQ	Enrobés	EG-5	ESG-10	ESG-14	GB-20
	à 1 000 cycles	≤ 10	≤ 10	n/a	n/a
	à 3 000 cycles	≤ 20	≤ 20	n/a	n/a
	à 30 000 cycles	n/a	n/a	≤ 10	≤ 10
SMA-Cpack	à 1 000 cycles	3,7	2,9	4,2	3,0
	à 3 000 cycles	6,0	4,7	4,6	3,8
	à 30 000 cycles	9,0	6,7	5,9	5,5

figure 11
Évolution de l'orniérage
pour les enrobés SMA-
Cpack évaluée à l'aide
de l'orniéreur français de
type MLPC.



CONCLUSIONS

L'importance de la fraction intermédiaire sur la formulation des enrobés SMA a été mise en évidence. Sur la base des concepts associés aux combinaisons granulaires, il a été montré que l'on pouvait formuler des enrobés SMA en réduisant de façon significative la teneur en bitume. Les premiers résultats de laboratoire laissent entrevoir une économie potentielle de près de 15 % de bitume pour ces enrobés, contribuant ainsi à une réduction appréciable du coût de production.

Une méthodologie de formulation visant à l'optimisation de la fraction la plus grossière pour des enrobés SMA (les enrobés SMA-Cpack) a été présentée. En laboratoire, cette optimisation permet d'atteindre plus rapidement la compacité de l'enrobé SMA.

La pierre angulaire du succès des enrobés SMA-Cpack réside dans l'optimisation de la performance du mastic. Par un dosage optimal du couple bitume-fin (bitume-filler) et l'utilisation d'un bitume performant, on espère atteindre une très bonne performance à l'orniérage ainsi qu'aux basses températures. Des recherches complémentaires sont actuellement en cours sur ce sujet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 VIATOP, Stone Mastic Asphalt The Name for Modern Roads, [En ligne]. http://www.sma-viatop.com/SMAviatop_engl/sma_entwicklung/start_sma_entw.shtml (Consulté le 12 janvier 2008).
- 2 BROWN E.R., HADDOCK J.E., CRAWFORD C., Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars, *Transportation Research Board* issue **1530**, Washington DC, **1996**, pp. 95-102.
- 3 EAPA (European Asphalt Pavement Association), *Heavy duty surfaces-The argument for SMA*, EAPA, **1998**, 40 pages.
- 4 ROBERTS F.L., KANDHAL P.S., BROWN E.R., LEE D.Y., KENNEDY T.W., *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Education Foundation, Second Edition, Maryland, **1996**, 585 pages.
- 5 TROUTBECK R., KENNEDY C., *Review of the use of Stone Mastic Asphalt (SMA) surfacings by the Queensland Department of Main Roads*, Report by the Queensland Department of Main Roads, Queensland Department of Main Roads, **2005**, 92 pages.
- 6 WEST R.C., *Mix Design and Aggregate Requirements for Stone Matrix Asphalt Mixtures*, Rapport de doctorat, université de Floride, **1995**.
- 7 WSDOT - Washington State Department of Transportation, *Stone matrix asphalt SR-524, 64th avenue West to I-5 MP 3.30 to MP 4.88*, Post Construction Report, Washington State Transportation Department Commission, **WA-RD 504.1**, novembre **2000**, 60 pages.
- 8 BROWN E.R., MANGLOKAR H., Evaluation of Laboratory Properties of SMA Mixtures, *NCAT Report*, **93-5**, Auburn, Alabama, **1993**.
- 9 VAVRIK W.R., PINE W.J., HUBER G., CARPENTER S.H., BAILEY R., The Bailey Method of Gradation Evaluation : The influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate, *Asphalt paving technology*, **2001**, Vol. **70**, Clearwater Beach Florida, pp. 132-175.
- 10 STEPHENSON G.J., BULLEN F., A review of the Design and Vacuum Creep Performance of the Stone Mastic Asphalt, *1st International Conference « World of Asphalt Pavements »*, Session 3A, Sydney, Australia, **2000**, pp. 81-107.
- 11 BROWN E.R., COOLEY L.A., HADDOCK J.E., HUGHES C.S., LYNN T.A., *Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures*, Vol. I-II-III-IV, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, National Center for Asphalt Technology Auburn University, juillet **1998**.
- 12 STEPHENSON G.J., BULLEN F., The design, creep and fatigue performance of Stone Mastic Asphalt, *ISAP*, **2002**, 1 : 3-1, 16 pages.
- 13 BROWN E.R., HADDOCK J.E., MALLICK R.B., LYNN T.A., Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA), *Asphalt Paving Technology 1997 – Journal of the Asphalt Paving Technologists*, **1997**, Vol. **66**, pp. 1-25.
- 14 SCHEROCMAN J.A., TIGHE S., Improving Canadian Performance of SMA by Maximizing Best Practices, *Proceeding of the 50th Annual Conference, Canadian Technical Asphalt Association*, **2005**, Vol. **50**, pp. 337-361.
- 15 BEN AÏM R., *Étude de la texture des empilements de grains. Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire, intermédiaire, laminaire*, Thèse faculté des sciences de l'université de Nancy, publication de l'université de Nancy, **1970**.
- 16 CAQUOT A., *Le rôle des matériaux dans le béton*, mémoires de la Société des ingénieurs civils de France, **1937**, pp. 562-582.
- 17 POWERS T.C., *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, Inc, New York, **1968**, 664 pages.
- 18 BARON J., SAUTEREY R. et al., *Le béton hydraulique : Connaissance et pratique*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, France, **1982**, 560 pages.
- 19 MTQ : Ministère des transports du Québec, *Enrobés : Formulation selon la méthode LC*, Gouv. QC, **2005**, 111 pages.
- 20 MEUNIER M., *Contribution à la mise au point des critères de formulation pour les enrobés SMA adaptée à la formulation LC*, mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, **2005**.
- 21 DELAPORTE B., DI BENEDETTO H., SAUZÉAT C., CHAVEROT P., *Linear viscoelastic properties of mastics : results from a new annular shearing rheometer, and modelling* BCRA, **2005**.
- 22 MOUTIER F., Réflexions à propos d'un essai de simulation de l'aptitude au compactage d'un enrobé : L'essai à la presse à cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, **1991**, **175**, pp. 93-97.

ANNEXE

CALCULS DES PROPORTIONS DE MÉLANGE

En considérant les équations suivantes :

$$d_{gb}^{comb} = \frac{M_g}{V_{gb}} \quad (A1)$$

$$V_{gb} = \frac{M_g}{d_{gb}^{comb}} \quad (A2)$$

$$f_i = \frac{M_{fi}}{M_g} \quad (A3)$$

Avec : f_i = dosage massique en fibre et V_{fi} , le volume solide de fibres, on a :

$$V_{gb} = \frac{M_g}{d_{gb}^{comb}} = 1000 - (V_{be} + V_i + V_{fi}) \quad (A4)$$

$$V_{gb} = \frac{M_g}{d_{gb}^{comb}} = 1000 - (V_{be} + V_i) - \frac{M_g * f_i}{d_{fi}} \quad (A5)$$

$$\frac{M_g}{d_{gb}^{comb}} + \frac{M_g * f_i}{d_{fi}} = 1000 - (V_{be} + V_i) \quad (A6)$$

$$M_g * \left(\frac{1}{d_{gb}^{comb}} + \frac{f_i}{d_{fi}} \right) = 1000 - (V_{be} + V_i) \quad (A7)$$

On obtient l'équation A8 qui donne la masse de granulats nécessaire à la confection de l'enrobé :

$$M_g = \frac{1000 - (V_{be} + V_i)}{\left[\frac{1}{d_{gb}^{comb}} + \frac{f_i}{d_{fi}} \right]} \quad (A8)$$

Si on prend l'exemple de formulation pour le **SMA-Cpack 20**, on a :

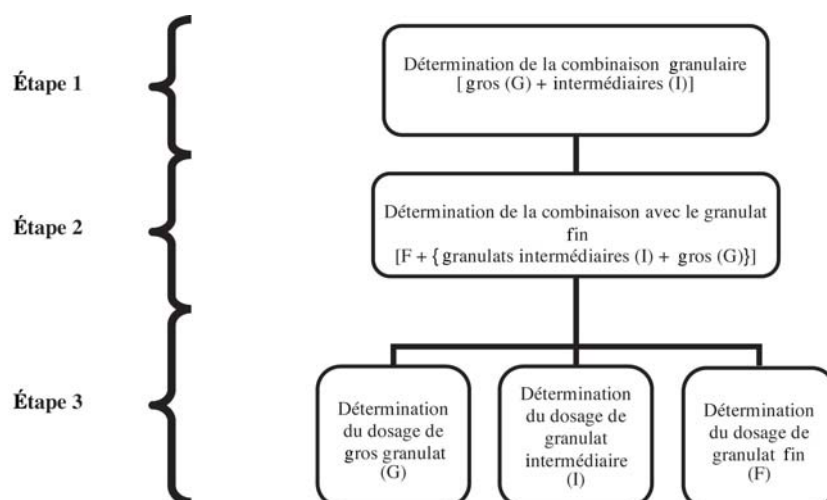
$$\begin{aligned} V_{be} &= 99 \text{ l/m}^3 \text{ pour une densité du bitume } (d_b) = 1,015 \\ V_i &= 50 \text{ l/m}^3 \text{ pour une teneur en vides résiduelle de 5 \% dans l'enrobé} \\ f_i &= 0,3 \% \text{ par rapport à la masse de granulat, avec une densité des fibres } (d_n) \text{ de 2,800} \end{aligned}$$

La masse totale de granulat est donc :

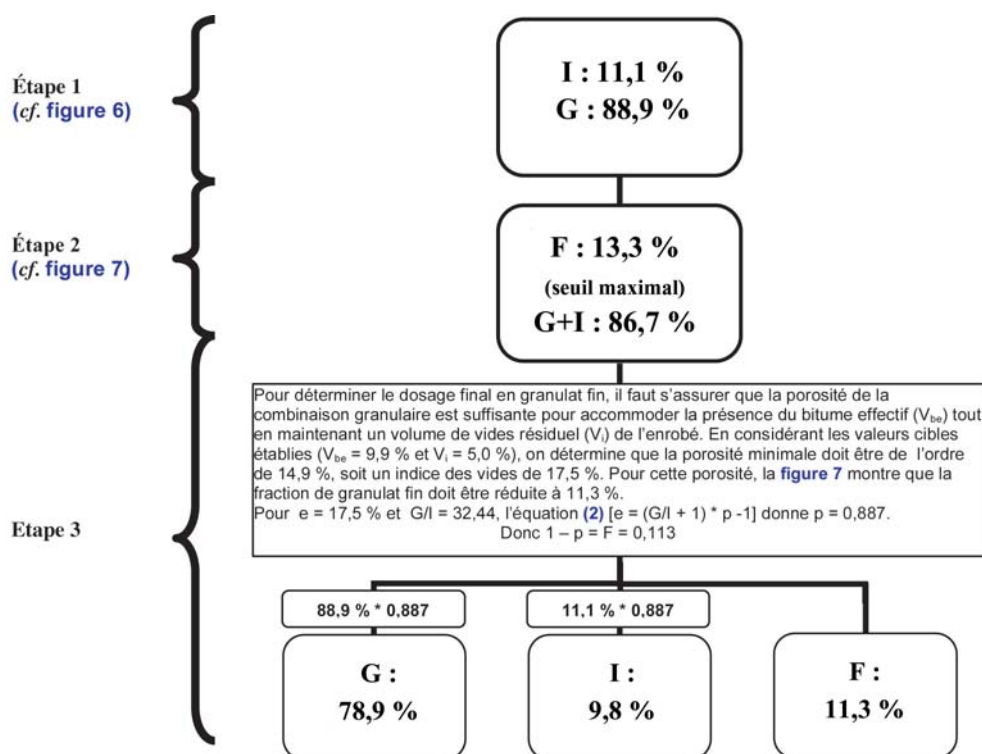
$$\begin{aligned} M_g &= \frac{1000 - (90 + 50)}{\left[\frac{1}{2,695} + \frac{0,003}{2,800} \right]} \\ M_g &= 2311,03 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Pour calculer les proportions de chacun des constituants, on doit se référer aux proportions établies à l'aide de la première et de la deuxième étape.

La procédure est la suivante :



Ceci mène aux calculs suivants :



Connaissant la masse totale de granulats et la proportion de chacun des constituants, on peut déterminer la masse de chacun d'entre eux pour un volume de référence (ici 1 m³) et établir ainsi les dosages de départ pour la formulation de l'enrobé **SMA-Cpack 20** en laboratoire :

$$\begin{aligned}
 \text{Masse de fibre (M}_f\text{)} &= 2\,311 \text{ kg/m}^3 * 0,3 \% \\
 &= 6,9 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de granulats fins (filler) (M}_f\text{)} &= 2\,311 \text{ kg/m}^3 * 11,3 \% \\
 &= 261,1 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de granulats intermédiaire (M}_i\text{)} &= 2\,311 \text{ kg/m}^3 * 9,8 \% \\
 &= 226,5 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de gros granulats (M}_g\text{)} &= 2\,311 \text{ kg/m}^3 * 78,9 \% \\
 &= 1\,823,4 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de bitume absorbée (M}_{ba}\text{)} &= (0,5 \% \text{ de l'absorption en eau des granulats}) = (0,5 \% / 100) * (\text{abs \%} / 100) * M_g \quad (\text{A9}) \\
 \text{Où abs (\%)} &= (G * \text{abs}_{GROS}) + (I * \text{abs}_{INT}) + (F * \text{abs}_{FILLER}) \\
 &= (0,789 * 0,5 \%) + (0,098 * 0,4 \%) + (0,113 * 1,0 \%) = 0,55 \% \\
 \text{Donc M}_{ba} &= 0,5 * (0,55 \% / 100) * 2\,311 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 6,4 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de bitume effectif (M}_{be}\text{)} &= d_b * V_{be} \\
 &= 1,015 * 99 \text{ l/m}^3 \\
 &= 100,5 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Masse de bitume totale (M}_b\text{)} &= (M_{ba} + M_{be}) \\
 &= 6,4 \text{ kg/m}^3 + 100,5 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 106,9 \text{ kg/m}^3 \\
 M_{mb} &= \Sigma \text{ Constituants} \\
 &= 2\,425 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Densité brute de l'enrobé (d}_{mb}\text{)} &= M_{mb} / 1000 \\
 &= 2,425 \\
 \text{Densité maximale de l'enrobé (d}_{mm}\text{)} &= d_{mb} / (1 - V_i) \\
 &= 2,552
 \end{aligned}$$

Proportions finales des constituants :

À partir de la masse de chacun des constituants pour le volume de référence (1 m³), on peut calculer le dosage massique correspondant, exprimé en pourcentage de la masse de l'enrobé, soit :

$$\begin{aligned}
 \text{Bitume : } b \% &= (M_b / M_m) * 100 \% = 106,9 \text{ kg/m}^3 / 2\,425 \text{ kg/m}^3 * 100 \\
 &= 4,41 \% \\
 \text{Fibre} &= 6,9 \text{ kg/m}^3 / 2\,425 \text{ kg/m}^3 * 100 \\
 &= 0,3 \% \\
 \text{Granulats fins (filler)} &= 261,1 \text{ kg/m}^3 / 2\,425 \text{ kg/m}^3 * 100 \\
 &= 10,77 \% \\
 \text{Granulats intermédiaires} &= 226,5 \text{ kg/m}^3 / 2\,425 \text{ kg/m}^3 * 100 \\
 &= 9,34 \% \\
 \text{Gros granulats} &= 1\,823,4 \text{ kg/m}^3 / 2\,425 \text{ kg/m}^3 * 100 \\
 &= 75,20 \% \\
 \text{Somme totale des constituants} &= 100 \%
 \end{aligned}$$