

Retraitement en place et à froid des couches de roulement Un exemple de travaux réduisant l'émission de GES et limitant le recours aux matériaux d'apport

B. ECKMANN & E. LAYERLE
Eurovia Management - France

bernard.eckmann@eurovia.com, eric.layerle@eurovia.com

F. DELFOSSE

Eurovia Centre de Recherches
frederic.delfosse@eurovia.com

RESUME

L'entretien des couches de surface est un problème quotidien pour les gestionnaires de voirie et la demande croissante pour la préservation des ressources naturelles et le recours à des procédés plus écologiques rend ce problème encore plus complexe. Ce contexte a poussé à la mise au point et au développement d'une technique de recyclage en place à froid utilisant soit une émulsion de bitume soit de la mousse de bitume. Le procédé permet la réhabilitation des couches de roulement de structures souples ou semi-rigides sur une profondeur allant jusqu'à 150 mm. Toutes les opérations constituant le processus de retraitement sont assurées par une unique et puissante machine dédiée (machine de retraitement à froid). Ce procédé constitue ainsi une alternative astucieuse aux techniques habituelles de réhabilitation/renforcement par rabotage et mise en place de matériaux neufs. Ses principaux avantages sont d'ordre économique et écologique, notamment en ce qui concerne la sauvegarde de matériaux neufs et la réduction des émissions associées à la fabrication et au transport des enrobés bitumineux à chaud. La communication présente un résumé des activités de recherche ayant appuyé ce développement et commente les données obtenues dans le cadre du suivi de plusieurs chantiers. L'ampleur des bénéfices environnementaux permis par ce procédé est démontrée par le biais de deux exemples concrets.

1. DESCRIPTION DU PROCEDE DE RETRAITEMENT EN PLACE A FROID

La technique de retraitement en place à froid mise en oeuvre par EUROVIA (RECYCLOVIA[®]) repose sur un matériel spécifique (Wirtgen 2200 CR) de forte puissance assurant l'ensemble des fonctions indispensables à la bonne exécution du procédé :

- Fragmentation par fraisage du matériau en place.
- Dosage et injection du liant, qui peut être une émulsion de bitume ou de la mousse de bitume. Dans ce dernier cas, la mousse de bitume est fabriquée directement sur la machine par injection simultanée, au travers de buses spécifiques, de bitume chaud et d'eau.
- Dosage et répartition des additifs minéraux éventuels (ciment/chaux).
- Injection d'eau permettant d'ajuster la teneur en eau du mélange.
- Homogénéisation et malaxage du mélange.
- Epandage et réglage du matériau traité à l'aide d'une table de finisseur.

Poids à vide : 47 t
Puissance : 800 cv 600 kW
Longueur : 15 m



Figure 1 – La machine de recyclage en place Wirtgen 2200 CR

Montée sur 4 chenilles indépendantes, l'engin s'adapte aisément à des tracés sinueux et opère jusqu'à 2,20 m de largeur. L'approvisionnement en liant – émulsion ou bitume pour la mousse – est réalisé par un camion citerne évoluant devant ou latéralement et relié au malaxeur par un tuyau flexible. L'eau, quant à elle, est stockée dans un réservoir intégré à la machine.

La réalisation d'un chantier est rapide, le rendement pouvant atteindre 3500 m²/jour. L'atelier de travail étant très compact, il limite fortement la gêne occasionnée aux usagers.

2. AVANTAGES ET LIMITES DU RETRAITEMENT EN PLACE A FROID

Le retraitement en place à froid offre des avantages économiques et environnementaux substantiels.

2.1. Economie de matériaux neufs.

La réduction de la consommation de matériaux neufs de carrière ou de ballastière constitue sans doute l'avantage le plus important. Comme il réutilise d'anciens matériaux bitumineux, le procédé consomme également moins de bitume qu'une reconstruction sans apport de matériaux recyclés.

2.2. Réduction des mises en décharge

Les matériaux de la chaussée existante sont intégralement réutilisés, ce qui élimine toute mise en décharge ainsi que les contraintes économiques et environnementales associées.

2.3. Réduction des activités de transport.

Le recyclage en place élimine le transport de matériaux fraisés vers une décharge ou vers une plate-forme de retraitement et réduit également le transport de matériaux neufs. Cela diminue non seulement les coûts de transport (énergie) mais aussi tous les effets indésirables de ce transport sur l'environnement (émissions) ainsi que pour les utilisateurs de la route et les riverains.

2.4. Economies d'énergie.

Les économies d'énergie proviennent avant tout de la réduction des transports mais aussi du processus de fabrication puisqu'il s'agit d'un procédé "à froid" ne nécessitant pas de chauffage des granulats.

2.5. Réduction des émissions.

Comme pour toute technique à froid, les émissions à la fabrication et à la mise en oeuvre sont réduites mais les gains les plus importants résultent de la réduction des transports.

2.6. Réduction de la gêne causée aux usagers et riverains.

Moins de transports et un atelier très compact diminuent notablement la gêne occasionnée aux usagers de la route ainsi qu'aux riverains du chantier.

Malgré ces avantages considérables, le recyclage en place à froid n'occupe encore qu'une place mineure parmi les techniques de réhabilitation employées en Europe. Pour expliquer cet état de fait, on peut par exemple se référer au rapport [1] émis en 2003 par le Comité Technique C 7/8 « Chaussées Routières » de l'Association Internationale Permanente des Congrès Routiers (AIPCR). Ce rapport a listé tout un ensemble d'exigences pratiques parmi lesquelles la qualité du matériau devant être retraité, les impératifs climatiques ainsi que les caractéristiques mécaniques à atteindre par le matériau recyclé apparaissent comme étant les plus contraignantes.

Conscient de ces difficultés, le groupe Eurovia a consacré d'importantes ressources à une meilleure compréhension des matériaux recyclés en place et à froid. L'animation du projet européen SCORE a constitué une première étape majeure. Depuis, cet effort est poursuivi sur une base plus permanente par le suivi d'un certain nombre de chantiers sélectionnés.

3. FONDEMENTS SCIENTIFIQUES – LE PROJET SCORE

Le projet SCORE - Superior Cold REcycling – a été financé par la Commission européenne dans le cadre du 5ème programme cadre pour la recherche et le développement (FP5). Le projet a été mené de juin 2002 à juin 2005 et a compté huit partenaires : PROBISA (Espagne, coordinateur), NYNAS (Royaume Uni), EUROVIA (France), SSZ (République tchèque), Produktion (Suède), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC – France), CEDEX (Espagne) et l'Université Joseph Fourier (France). Tous les aspects du recyclage, depuis la caractérisation des fraisats jusqu'à la formulation des matériaux recyclés, ont été abordés et le projet s'est conclu par la réalisation de plusieurs planches d'essai [2-4]. SCORE s'est cependant limité au recyclage de matériaux bitumineux (fraisats d'enrobé). A titre d'exemple, deux points particuliers de cette recherche sont brièvement exposés ci-après.

3.1. Incidence des conditions de fraisage

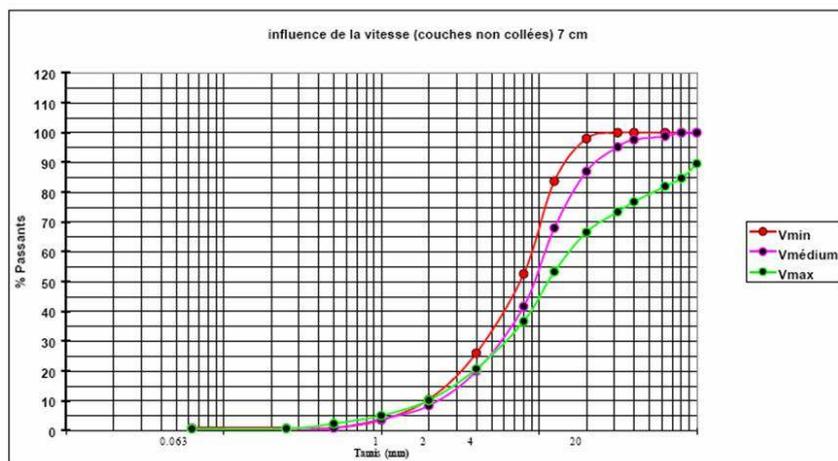


Figure 2 – Incidence de la vitesse d'avance. Profondeur : 7 cm. Couches décollées [3]

Dans le cas du recyclage en place, la granulométrie du matériau fraisé conditionne fortement la qualité du résultat final. Pour faciliter le compactage et améliorer les performances mécaniques de la couche recyclée, la taille maximale du fraisat doit être la plus faible possible. La courbe granulaire obtenue dépend fortement de la nature et de l'état de dégradation du matériau à recycler mais le projet SCORE a montré qu'elle pouvait être sensiblement améliorée par le choix de conditions opératoires adaptées. Travailler avec un maximum de dents (à remplacer régulièrement dès qu'elles sont usées) et de fortes vitesses de rotation du tambour sont bien sûr des éléments favorables. Dans la pratique, c'est cependant la réduction de la vitesse d'avance (Figure 2) qui permet de s'adapter de la façon la plus immédiate à la plupart des situations. Dans des cas extrêmes (couches fortement dégradées et décollées de leur support), il peut cependant s'avérer nécessaire de procéder à un rabotage préliminaire de la couche supérieure.

3.2. Performances mécaniques du matériau recyclé

Un aspect important de la performance d'un matériau recyclé à froid est la résistance mécanique obtenue à l'issue de la période de cure ainsi que le temps nécessaire pour arriver à ce stade final. Pour étudier ce point, le projet SCORE a évalué différentes méthodes de mûrissement accéléré en laboratoire, en suivant l'évolution des propriétés mécaniques avec le temps par la mesure du module de rigidité. [4]. Ces essais ont été menés sur des matériaux recyclés à l'émulsion aussi bien qu'à la mousse de bitume.

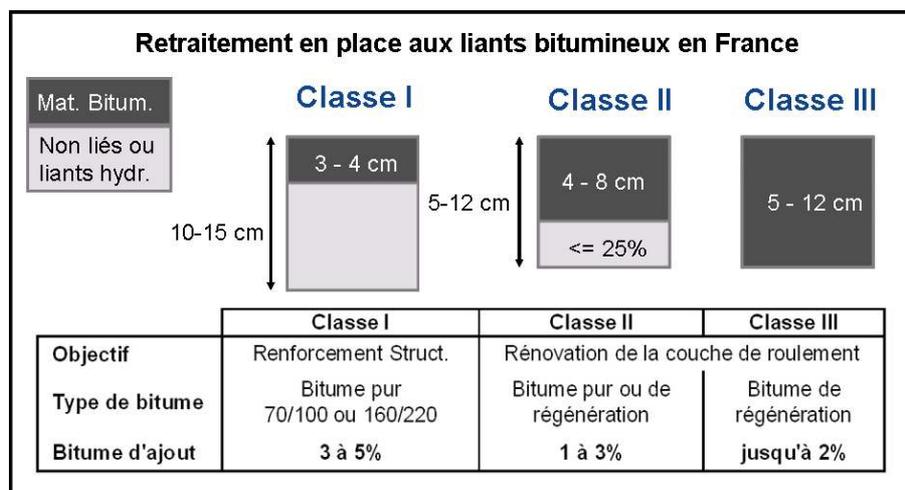
Comme il n'est en général pas possible d'obtenir avec des matériaux recyclés en place et à froid le même niveau de compacité que celui atteint avec des matériaux conventionnels à chaud, il est de plus important de définir des procédures de compactage de laboratoire conduisant à des teneurs en vides (env. 15 %) similaires à celles obtenues sur chantier. La presse à cisaillement giratoire s'est révélée être bien pratique à cet égard.

Ces études ont confirmé que les caractéristiques initiales du fraisat ainsi que la compacité du matériau obtenu ont un impact prépondérant sur la rigidité finale alors que l'origine du bitume ou la nature du liant (émulsion ou mousse) ne semblent avoir qu'une incidence mineure. Par contre, les conditions de mûrissement accéléré ne sont pas applicables indifféremment à tout type de matériau. Dans le cas de l'addition d'une quantité importante de ciment, par exemple, une procédure de mûrissement trop rapide peut stopper la montée en cohésion par un « assèchement » prématuré de l'échantillon. La taille de celui-ci peut également influencer de façon significative la vitesse de montée en cohésion. Il y a donc une certaine interdépendance entre la procédure de mûrissement, la taille de l'échantillon ainsi que la formulation du matériau. La procédure de mûrissement doit dès lors être définie selon la méthodologie d'essais (taille de l'échantillon) et le type de matériau à évaluer. C'est cependant une des procédures utilisée par SCORE (voir § 5.1.2.) qui a été retenue pour les suivis de chantiers exposés ci-après.

4. LE RETRAITEMENT EN PLACE A FROID EN FRANCE

En France, les lignes directrices pour le retraitement en place à froid ont été établies par le Comité Français des Techniques Routières (CFTR) [5]. Dans le cas du retraitement avec des liants bitumineux (émulsions de bitume), ce guide retient trois classes de retraitements (Tableau 1). Pour ce qui est des exigences mécaniques devant être satisfaites lors de l'étude de formulation, les critères sont basés sur l'essai de compactibilité à la presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252) ainsi que sur la résistance à la compression et la sensibilité à l'eau mesurés par l'essai DURIEZ (NF P 98 251-4). Pour ce qui est du dimensionnement, des valeurs moyennes de module de rigidité sont préconisées selon la classe de retraitement et les résistances à la compression DURIEZ obtenues.

Tableau 1 – Les trois classes considérées en France pour le retraitement en place à l'émulsion de bitume [5]



Bien que ces lignes directrices constituent une excellente base, le développement et l'optimisation de la technique reste conditionné par une meilleure compréhension des

mécanismes par lesquels ces matériaux acquièrent leur résistance mécanique avec le temps. Ceci est plus particulièrement vrai pour les retraits de Classe I (non étudiés dans le cadre de SCORE) pour lesquels la performance des matériaux de base non liés ou liés aux liants hydrauliques est plus sujette à variations et moins facile à prévoir. Ce sont ces considérations qui ont incité EUROVIA à continuer les efforts entamés lors du projet SCORE [6].

5. SUIVIS DE CHANTIERS

Depuis 2005, des carottages sont effectués régulièrement sur un certain nombre de chantiers **RECYCLOVIA**[®] en France. En règle générale, les travaux de Classe I et II sont réalisés à la mousse de bitume (grade 70/100). En présence de matériaux non liés ou liés aux liants hydrauliques, la technique de la mousse est en effet particulièrement intéressante car moins sensible à la réactivité chimique des granulats que ne le serait la technique à l'émulsion. Dans le cas des retraits de Classe III, le bitume (le plus souvent de grade 160/220) est généralement apporté sous forme d'émulsion. L'évolution avec le temps des matériaux retraités est suivie par la mesure du module de rigidité sur les carottes extraites.

De plus, au cours de l'année 2006, une importante campagne de prélèvement de différents fraisats a été réalisée. Il s'agissait de reproduire le matériau recyclé en laboratoire, de déterminer ses propriétés mécaniques après un mûrissement accéléré et de comparer ces résultats à ceux obtenus sur les matériaux prélevés in-situ. Trois de ces fraisats étaient des matériaux de Classe III traités avec une émulsion de bitume 160/220 (matériaux A et D) ou à la mousse de bitume 70/100 (matériau E). Deux fraisats étaient de Classe I et ont été traités à la mousse de bitume 70/100 (matériaux B et C).

5.1. Propriétés des matériaux recyclés en laboratoire

Les caractéristiques mécaniques des cinq matériaux recyclés préparés au laboratoire ont été évaluées selon deux procédures.

5.1.1 Essais DURIEZ (NF P 98-251-4)

La procédure DURIEZ, conçue à l'origine pour les enrobés à chaud, mesure la résistance à la compression axiale d'échantillons cylindriques (compactés statiquement) après une période de cure dans l'air ou dans l'eau. La taille de l'échantillon d'essai dépend de la taille maximale du granulat de l'enrobé. Pour les matériaux à l'émulsion, la norme française prévoit, en plus de la procédure habituelle de compactage (charge de 120 kN pour les grands échantillons), une deuxième modalité de compactage dans laquelle la charge appliquée est réduite à un tiers de la charge normale (40 kN). Les résultats obtenus selon ces deux modalités de compactage sont rassemblés dans le tableau 2 qui indique également les valeurs spécifiées par le Guide français [5] dans le cas de la modalité de compactage lourde.

Il n'est pas surprenant de constater que la compacité finale s'est révélée être très tributaire des caractéristiques du fraisat ainsi que du type de traitement. Les résistances à la compression obtenues avec la charge de compactage de 120 kN dépassent de loin les spécifications mais ne semblent pas être corrélées avec la teneur en vides (matériaux de Classe III). La résistance à l'eau (ratio r/R) répond aux limites spécifiées, parfois cependant de justesse (matériaux de Classe I).

Lorsque la charge de compactage est réduite, les teneurs en vides sont nettement plus importantes et les résistances à la compression chutent de façon significative. Le rapport

r/R baisse également un peu et semble être plus affecté dans le cas des matériaux de Classe I que dans celui des matériaux de Classe III (ce qui est conforme à l'intuition).

Le rôle prépondérant de la charge de compactage constitue certainement l'enseignement majeur de ces résultats. Compte tenu des teneurs en vides généralement obtenues in-situ (plutôt dans une fourchette allant de 10 % à 15 % voire 20 % qu'inférieures à 10 %) il paraît dès lors logique de considérer que, pour ce type de matériaux, c'est la charge de compactage réduite qui devrait être retenue.

Tableau 2 – Résultats DURIEZ

Matériau	CLASSE III				CLASSE I		
	A	D	E	Specs.	B	C	Specs.
	Compactage à 120 kN					Compactage à 120 kN	
Teneur en vides (%)	7.4	5.4	2.6	<= 14	11.1	8.5	
Résistance à la compression							
R (MPa)	7.02	6.15	6.72	>= 5	4.22	6.15	>= 1,5
r (MPa)	5.59	4.56	5.56		2.54	3.34	
r/R	0.8	0.74	0.83	>=0,70	0.6	0.54	>=0,55
	Compactage à 40 kN					Compactage à 40 kN	
Teneur en vides (%)	14.2	11.8	6.7		14.2	13	
Résistance à la compression							
R (MPa)	3.83	3.34	4.37		2.71	3.86	
r (MPa)	2.72	2.27	3.37		1.06	1.8	
r/R	0.71	0.68	0.77		0.39	0.47	

5.1.2 Essais de mûrissement accéléré et module de rigidité

Tous les échantillons ($\Phi = 150$ mm, $h \sim 115$ mm) destinés à la mesure du module de rigidité ont été compactés à la presse à cisaillement giratoire (PCG type II – NF P 98 252). Deux niveaux de compacité ont été visés, de façon à se rapprocher autant que possible des valeurs obtenues selon les deux modalités de compactage DURIEZ.

Les éprouvettes ainsi compactées ont été soumises à la procédure de mûrissement accéléré issue du projet SCORE et d'autres recherches [4, 7]. La procédure de mûrissement comportait deux étapes successives. Durant les 7 premiers jours, devant simuler la phase initiale juste après la mise en oeuvre, les éprouvettes ont été maintenues à 18°C et 55% d'humidité relative (HR). Lors de la deuxième étape, les éprouvettes ont été maintenues pendant 14 jours à 35°C et 20 % HR, ceci afin d'accélérer le processus (sans cependant introduire de biais supplémentaire du fait d'une température trop élevée) et d'approcher ainsi les propriétés mécaniques finales du matériau. Le module de rigidité dynamique des éprouvettes a été mesuré par compression axiale (CA) à 15°C-10Hz (presse MTS à asservissement électro-hydraulique) tout au long de la phase de mûrissement (en principe à 3, 7, 10, 14 et 21 jours). Ce mode d'essai sur grandes éprouvettes a été privilégié afin d'éviter autant que possible d'endommager le matériau, notamment dans les premiers jours. Une fois le mûrissement terminé, il a été possible de préparer par sciage des éprouvettes de 50 mm de haut dont on a pu mesurer le module par un essai de traction indirecte en compression diamétrale, soit en mode sinusoïdal (IT-S), soit par impulsion (IT-P). Nous avons ainsi pu montrer que :

- Les valeurs du module de rigidité mesurées à 15°C-10Hz sous compression diamétrale sinusoïdale sont comparables à celles obtenues, à la même température et fréquence, sous chargement axial.
- Elles sont également comparables à celles obtenues par compression diamétrale par impulsion à une température de 10°C pour un temps de chargement de 124 ms.

Les valeurs finales de rigidité obtenues après 21 jours de cure sont reproduites sur les figures 3 et 4. Ces valeurs diffèrent d'un matériau à l'autre. Les raisons possibles (granulométrie des fraisats, nature du retraitement, caractéristiques des bitumes résiduels et des liants d'ajout, ...) sont cependant trop nombreuses pour que l'on puisse établir une quelconque relation entre ces résultats et la formulation des matériaux. La très forte dépendance de la rigidité envers la compacité constitue à nouveau l'observation majeure.

5.2. Evolution de la rigidité in-situ

5.2.1. Etude de carottes prélevées sur des chantiers de Classe III

Bien qu'ils soient plutôt dispersés, les modules de rigidités mesurés sur les carottes de chantier montrent la même dépendance envers la compacité que ceux mesurés sur les échantillons fabriqués en laboratoire. Les teneurs en vides sont fréquemment supérieures à 15 %, ce qui conduit à des valeurs de module inférieures à 3000 MPa ou même inférieures à 2000 MPa. Des valeurs entre 3000 MPa et 4000 MPa sont plus facilement obtenues lorsque la teneur en vides reste inférieure à 15 %.

Le matériau A est le seul pour lequel une comparaison directe (compacité similaire) avec les échantillons mûris en laboratoire est possible. Après 5 mois, les résultats de chantier se révèlent être très proches des résultats en laboratoire. En général, la rigidité maximale sur chantier semble être obtenue dans la première année.

Le matériau 3/a constitue une exception car les teneurs en liant du fraisat ainsi que de l'enrobé final se sont révélées être beaucoup plus fortes que prévu lors des études initiales. Cela explique sans doute la faible teneur en vides (mais sans doute sous-estimée) ainsi que les faibles valeurs de rigidité (plus forte cependant à 17 mois).

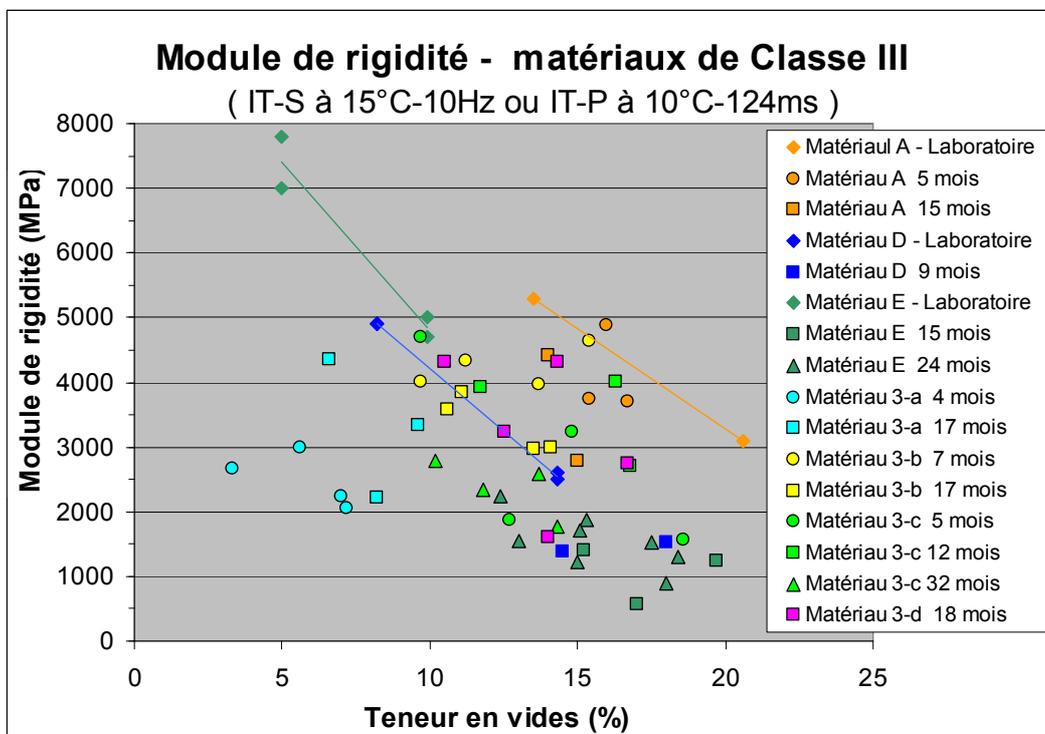


Figure 3 – Module de rigidité – Matériaux de Classe III

5.2.2. Etude de carottes prélevées sur des chantiers de Classe I & II

A nouveau, nous observons une forte relation entre la rigidité et la teneur en vides. Des teneurs en vides inférieures à 15 % et proches de 10 % semblent cependant pouvoir être obtenues plus facilement que dans le cas des matériaux de Classe III. Il est possible que cela soit imputable à la granulométrie des fraisats qui, notamment lorsqu'ils comprennent des matériaux non liés, sont plus riches en sable et en fines, ce qui les rendrait plus faciles à densifier que les matériaux de Classe III. Les modules de rigidité associés sont alors plus souvent compris entre 3000 MPa et 5000 MPa que dans le cas des matériaux de Classe III.

En raison de la faible compacité des carottes de chantier, les modules de rigidité mesurés sur le matériau C après 12 mois sont assez faibles mais suivent la même tendance que celle indiquée par les échantillons mûris en laboratoire. Pour le matériau B l'évolution de la rigidité semble cependant différente de celle suggérée par les essais de mûrissement en laboratoire. La principale raison tient sans doute à la plus grande hétérogénéité de ce type de matériau (75 % de fraisats « blancs ») et, par voie de conséquence, à une plus grande différence entre les fabrications de laboratoire et le chantier.

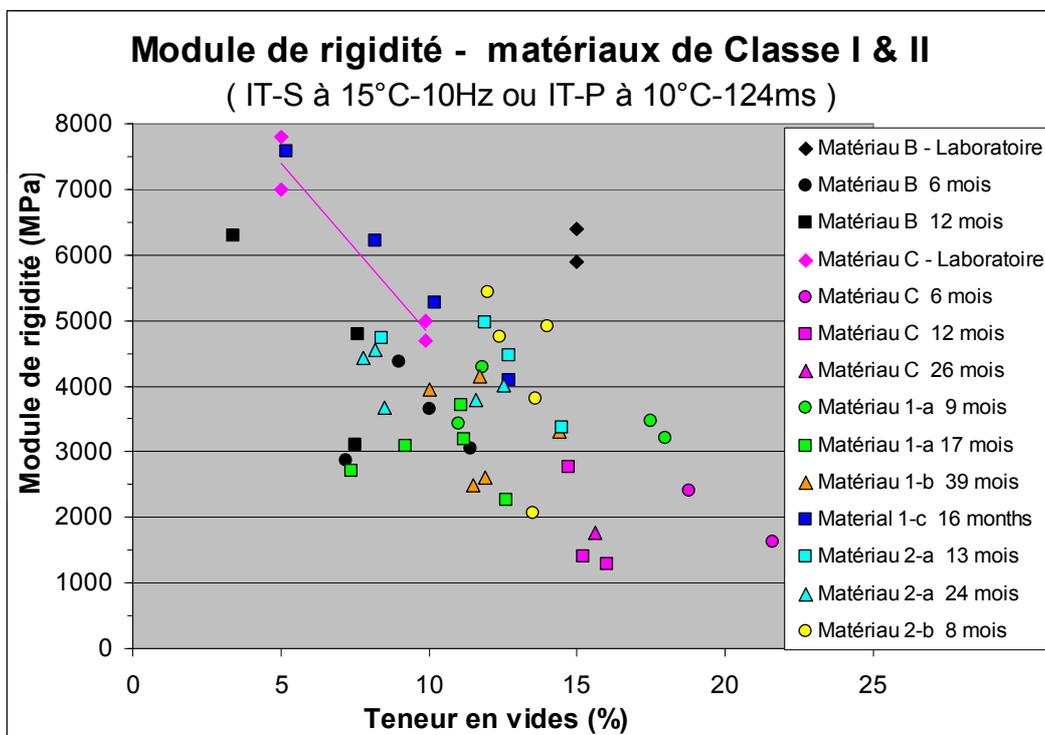


Figure 4 – Module de rigidité – Matériaux de Classe I & II

5.3. Suivis de chantiers - quelques conclusions

Le principal enseignement de nos investigations est certainement qu'elles ont constamment mis en évidence l'incidence prépondérante de la compacité sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression et module de rigidité). Il est alors recommandé que les études de formulation pour les matériaux retraités à froid soient effectuées sur base d'éprouvettes d'essai compactées à des densités réalistes (susceptibles d'être obtenues sur chantier). La réduction de la charge de compactage (procédure DURIEZ) ainsi que la diminution du nombre de girations dans le cas d'éprouvettes fabriquées à la presse à cisaillement giratoire sont des voies possibles pour atteindre cet objectif.

L'ensemble encore limité de données comparatives entre des échantillons mûris en laboratoire et des carottes de chantier ne permet pas encore d'établir des conclusions définitives quant à la pertinence de la procédure de mûrissement accéléré utilisée dans cette étude.

Dans la plupart des cas (notamment pour les matériaux à forte teneur en vides) la rigidité in-situ semble se stabiliser assez rapidement (entre 6 et 18 mois). Dans le cas des matériaux de Classe III, le niveau atteint est alors bien en adéquation avec la ligne d'évolution de la rigidité en fonction de la teneur en vides obtenue avec la procédure accélérée décrite dans le § 5.1.2.

La situation est moins claire dans le cas des matériaux de Classe I & II recyclés à la mousse de bitume pour lesquels des données supplémentaires, aussi bien de laboratoire que de chantier, sont manifestement nécessaires.

6. BONNE PRATIQUE – DOMAINE D'EMPLOI

Une analyse plus approfondie des circonstances particulières de chaque chantier nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de facteurs influençant les compacités ainsi que les modules de rigidité observés. Les caractéristiques du fraisat (granulométrie, teneur et dureté du bitume résiduel) mais aussi la capacité portante du support ainsi qu'un compactage insuffisant sont ceux ayant la plus forte incidence sur la compacité finale. De bonnes conditions de mûrissement sont également indispensables. Le retraitement en place à froid doit de ce fait être préférentiellement réalisé au printemps et en début d'été. Il est de plus important d'assurer un bon drainage de la structure et de couvrir la couche retraitée avec une couche de roulement d'épaisseur appropriée. Des manquements à l'un ou plusieurs de ces préceptes étaient avérés dans le cas des matériaux A, D et C et peuvent donc expliquer la performance in-situ plutôt faible de ces matériaux.

Conjointement avec les études de laboratoire exposées plus haut, les suivis de chantier ont ainsi permis à EUROVIA de mieux cerner les limites d'utilisation de la technique de retraitement en place à froid telle que pratiquée avec la machine Wirtgen 2200 CR. Ces limites sont résumées ci-après.

6.1. Conseils de bonne pratique

Dans le cas de base où, à l'exception d'une quantité minimale de chaux ou de ciment, il n'y a aucun apport de matériau minéral neuf, la courbe granulométrique d'un matériau retraité en place est essentiellement conditionnée par les paramètres de fraisage ainsi que par l'état de dégradation de la couche fraisée. Nous avons vu dans le § 3.1 que l'optimisation des paramètres de fraisage permet d'influencer de manière significative la taille des plus gros éléments et donc de faciliter le compactage et l'obtention d'un bon uni pour la couche retraitée. D'une façon générale, les matériaux fraisés se caractérisent en effet par une granulométrie « ouverte » (fraction sableuse peu importante) qui rend leur compactage intrinsèquement difficile. Ceci est plus particulièrement vrai pour les matériaux de Classe III dont les teneurs en vides se situent typiquement entre 15 % et 20 %. Dans des conditions bien maîtrisées et favorables (notamment sur des supports rigides), des valeurs comprises entre 10 % et 15 % sont cependant possibles. Cette fourchette peut sans doute être obtenue plus facilement pour des matériaux de Classe I et II incorporant une certaine teneur de matériaux granulaires non liés. Dans ce cas, la granulométrie est souvent plus favorable au compactage, à la condition cependant que cet avantage potentiel ne soit pas annulé par le caractère plus frottant du matériau.

Le retraitement en place impose également le compactage en une seule couche du matériau retraité. Cette contrainte, qui s'ajoute aux considérations ci-dessus relatives à la

granulométrie des fraisats, explique que, plus encore que les possibilités intrinsèques de la machine de recyclage, ce sont les possibilités de l'atelier de compactage ainsi que l'état du support qui conditionnent la profondeur maximale de traitement pour le procédé RECYCLOVIA®. Bien que la machine permette des profondeurs allant jusqu'à 18 cm, notre expérience confirme les recommandations données par le Guide du SETRA [5], i.e. une profondeur maximale de 12 cm pour des retraitements de Classe II et III et de 15 cm pour des retraitements de Classe I.

Comme pour tout matériau à froid, de bonnes conditions de mûrissement sont indispensables pour assurer le succès d'une opération de recyclage en place à froid. Ce qui signifie que les chantiers de fin d'automne sont à proscrire, tout particulièrement lorsque les conditions climatiques sont défavorables (climat humide, zones montagneuses). La première phase de mûrissement peut être accélérée en retardant de 2 à 3 semaines la mise en œuvre de la couche de couverture (il faut néanmoins que les conditions météorologiques restent favorables). L'application d'un enduit de scellement, qui protège la couche fraîchement retraitée contre les arrachements et la pénétration de l'eau permet néanmoins une ouverture immédiate au trafic. Des conditions météorologiques favorables ne sont cependant pas les seuls garants d'une montée en cohésion importante et rapide. Il faut également assurer un drainage correct de l'ensemble de la structure. Les travaux nécessaires (curage de fossés) ne doivent jamais être négligés !

Comme dit précédemment, le compactage du matériau retraité se fait en une seule fois. Plus l'épaisseur traitée est importante et plus il devient difficile de garantir un bon profil longitudinal et transversal. La correction de l'uni ainsi que la nécessité de protéger un matériau présentant une faible compacité et une faible rigidité au jeune âge rendent obligatoire la pose d'une couche de couverture dont l'épaisseur dépend également beaucoup de l'intensité du trafic attendu.

Le procédé de retraitement décrit ici est entièrement tributaire de l'état de la chaussée existante et de la qualité intrinsèque des matériaux en place. Il devient alors essentiel d'appréhender ces éléments suffisamment tôt pour évaluer correctement à la fois la faisabilité et la pertinence économique du projet envisagé. Cela appelle des investigations préliminaires (appréciation visuelle, mesures de déflexion, carottages, ...) pour déterminer la structure de la chaussée existante, son état (capacité portante, collage des couches) ainsi que l'origine des désordres constatés. Il est également important de déterminer la variabilité de ces paramètres tout au long du chantier car des fluctuations trop importantes peuvent compromettre la faisabilité de la technique.

Les carottes et prélèvements de matériaux doivent être aussi représentatifs que possible des différentes zones « homogènes » ainsi identifiées car ils seront à la base des études de formulation de laboratoire. C'est à ce stade que des procédures de laboratoire adaptées (pour la fabrication d'éprouvettes d'essai ou encore le mûrissement accéléré) ainsi que l'expérience acquise par l'ingénieur routier, prennent toute leur importance.

Dans le cas des chantiers de Classe I et II caractérisés par une teneur variable en matériaux non liés ou traités aux liants hydrauliques, nous estimons qu'il est préférable de recourir à la mousse de bitume. Cela permet en effet d'éviter le problème de la maîtrise de la rupture d'une émulsion bitumineuse selon la réactivité variable de ces matériaux « blancs ». Dans beaucoup de cas, il est également recommandé d'associer à la mousse une certaine quantité (0.5 à 1 %) de chaux permettant de diminuer la sensibilité à l'eau du matériau final. L'émulsion de bitume est préférentiellement (mais pas exclusivement)

utilisée dans le cas des matériaux de Classe III n'ayant qu'une faible réactivité. L'addition de ciment permet d'augmenter la cohésion initiale et est plus particulièrement indiquée lorsque les conditions de mûrissement attendues ne sont pas très favorables.

6.2. Domaine d'emploi

Comme il a été montré en § 5.2, les niveaux de rigidité susceptibles d'être obtenus pour des matériaux retraités en place à froid moyennant le respect des règles de « bonne pratique » énoncées en § 6.1 vont de 3500 MPa à 4500 MPa (15°C-10Hz). Ces valeurs relativement modestes impliquent que le pouvoir de renforcement intrinsèque d'une couche de matériau retraitée en place à froid est limité. Dans le cas où la chaussée existante souffre d'une faiblesse structurelle et/ou dans le cas d'un fort trafic, l'épaisseur de la couche de couverture nécessaire sera relativement importante. Rappelons cependant à ce stade que la technique n'a été utilisée qu'avec un apport minimal d'additifs minéraux tels que le ciment ou la chaux (max. 1 %). Il est certainement possible d'obtenir des rigidités nettement plus importantes en augmentant ces quantités mais cela n'a pas été fait à ce jour pour des raisons économiques et par crainte des de la fissuration de retrait.

En d'autres termes, c'est l'épaisseur de la couverture bitumineuse imposée par la capacité structurelle de la chaussée existante ainsi que par le volume de trafic attendu qui va déterminer la pertinence économique et l'acceptabilité de la technique de retraitement en place à froid. Celle-ci est plus particulièrement adaptée pour remédier à des désordres superficiels tels que le vieillissement, l'usure, le décollement, des couches de surface dans le cas de chaussées en bon état structurel telles que des structures bitumineuses épaisses ou des structures semi-rigides. Dans ces cas, la profondeur de traitement ne dépassera généralement que de peu l'interface de la couche usée (typiquement de 5 à 8 cm) et l'épaisseur de la nouvelle couverture bitumineuse sera dictée par les exigences en matière d'uni final ainsi que par l'ampleur du trafic plutôt que par des considérations de dimensionnement. Dans les cas où la chaussée demande une profondeur de traitement plus importante et lorsque la capacité structurelle n'est plus suffisante au regard du trafic attendu (par exemple dans le cas de chaussées souples), l'épaisseur de la nouvelle couverture bitumineuse sera plus directement imposée par des considérations de dimensionnement. Il est manifeste que, dans tous les cas, une appréciation correcte de l'état structurel de la chaussée existante est indispensable pour une conception correcte et le succès d'une opération de retraitement en place à froid.

7. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

7.1. Un outil spécifique

Comme énoncé plus haut, les bénéfices environnementaux sont l'un des principaux arguments en faveur du retraitement en place à froid et, lors d'une réponse à un appel d'offres, ces aspects devraient être évalués au même titre que les aspects purement techniques. C'est dans ce but qu'EUROVIA a conçu et développé un logiciel de calcul spécifique appelé GAÏA_{BE}. Pour un chantier donné, cet outil permet d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux pour différentes solutions d'entretien. Cela signifie que toutes les données d'entrée devant être renseignées, telles que les distances d'approvisionnement, le type de transport, la nature des engins de fabrication et de mise en œuvre, sont celles concernant directement le chantier étudié. Les indicateurs environnementaux ainsi que la méthodologie appliquée par le logiciel sont conformes à

ceux définis par les normes NF P 01-010 et NF EN 14040 relatives à l'analyse du cycle de vie. Ce sont notamment l'épuisement des ressources naturelles, la consommation d'énergie ainsi que l'émission de gaz à effet de serre (GES). Le logiciel considère également un certain nombre d'indicateurs supplémentaires plus spécifiquement liés à l'industrie routière tels que la consommation de granulats naturels, la consommation directe de fuel ou la quantité de transport local routier.

Pour illustrer et quantifier les bénéfices environnementaux potentiellement amenés par le retraitement en place à froid deux exemples concrets de calculs GAIA_{BE} sont présentés ci-après. Six indicateurs environnementaux ont été retenus.

Epuisement des ressources naturelles (ADP – Abiotic Depletion Potential)

Somme des ressources naturelles prélevées dans l'environnement (granulats, bitume, ...). Chaque élément est pondéré par un coefficient qui traduit sa plus ou moins grande rareté dans la nature. Le résultat final est donné sous forme d'une masse équivalente d'Antimoine (kg S_b equ.)

Consommation de granulats naturels

Cet indicateur spécifique correspond à la quantité de granulats naturels (hors granulats recyclés et artificiels) utilisés pour la réalisation du chantier.

Consommation des ressources énergétiques

Energie utilisée pour élaboration des matériaux, leur transport et la réalisation du chantier. Elle est la somme des consommations directes (activités de l'entreprise routière) et indirectes (activités en amont et en aval). L'indicateur retenu (exprimé en MegaJoules – MJ) est la consommation totale de ressources énergétiques i.e. une somme pondérée des ressources énergétiques renouvelables et non renouvelables.

Consommation directe de fuel

Consommation d'énergie directement liée à la réalisation du chantier, i.e. le fuel ou le gaz utilisés pour la fabrication d'enrobés, les transports depuis et vers le chantier, les opérations de retraitement et de mise en œuvre. L'indicateur est exprimé en litres de fuel équivalents (l fuel equ.).

Emission de gaz à effet de serre

L'effet de serre est le principal phénomène rendu responsable des changements climatiques. Il est induit par l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz appelés "gaz à effet de serre" (GES). L'indicateur correspondant est égal à la somme des quantités de GES émis, pondérées par un coefficient de pouvoir "effet de serre". Ainsi, par exemple, 1 kg de méthane (CH₄) équivaut à 21 kg de CO₂. L'indicateur pour les émissions de gaz à effet de serre est alors exprimé en kg CO₂ equ.

Transport local routier

Cet indicateur traduit la gêne causée par le transport de matériaux depuis et vers le chantier. Il est égal au produit de la masse transportée par la distance parcourue (t.km).

7.2. Impact sur l'environnement – Exemple N° 1.

Le premier exemple traité correspond à un chantier typique de retraitement en place à froid de "Classe III" (voir § 4) consistant à renouveler une couche de surface bitumineuse dégradée (arrachements, défauts de collage au support). La structure en tant que telle est saine et ne nécessite pas de renforcement. La solution conventionnelle consisterait à raboter la couche de roulement sur une profondeur de 7 cm et à la remplacer par 5 cm d'un béton bitumineux semi-grenu fermé par 2.5 cm d'un enrobé très mince. La solution alternative consiste à traiter en place (toujours sur 7 cm) la couche de surface usagée avec une émulsion de bitume et une faible quantité de ciment, ce traitement étant suivi par l'application d'un enrobé mince en 4 cm d'épaisseur. Ces données, ainsi que les valeurs résultantes pour les six indicateurs définis plus haut, sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 – Impact sur l'environnement – Cas d'un projet de retraitement de Classe III

Description du projet	Profondeur / Epaisseur (cm)	Quantité (tonnes)	Distance de transport (km)	t.km
Solution conventionnelle				
Rabotage de la structure existante / Evacuation du fraisat	7	5 900	40	236 000
Mise en œuvre d'un nouvel enrobé	5	4 200	40	168 000
Nouvelle couche de surface	2.5	2 100	40	84 000
				488 000
Retraitement en place à l'émulsion (Classe III)				
Approvisionnement en eau	7	-	-	1 700
Approvisionnement en émulsion	-	170	10	24 750
Approvisionnement en ciment	-	29	200	5 800
Nouvelle couche de surface	4	3 300	40	132 000
				164 250
Indicateurs environnementaux	Solution de base Retraitement en place			
Épuisement des ressources naturelles ADP (kg Sb equ.)	10 543	7 508	-29%	(1)
Consommation des ressources énergétiques (MJ)	5 405 974	3 614 278	-33%	(1)
Emission de gaz à effet de serre (kg CO2 equ.)	336 830	236 435	-30%	(1)
Consommation de granulats naturels (tonnes)	5 961	3 167	-47%	(2)
Consommation directe de fuel (l fuel equ.)	92 506	49 055	-47%	(2)
Transport local routier (t.km)	488 000	164 250	-66%	(2)

(1) Indicateur calculé selon les préconisations de la norme NF P 01-010 de décembre 2004
(2) Indicateur spécifique à GAIAEE

7.3. Impact sur l'environnement – Exemple N° 2.

Le deuxième exemple correspond au cas d'une couche de roulement dégradée (5 cm de matériaux bitumineux) posée sur une base traitée au liant hydraulique. La solution conventionnelle consisterait en un rabotage sur 6 cm suivi par la pose de 6 cm d'un enrobé semi-grenu et de 4 cm d'enrobé mince. La variante consiste en un retraitement en place sur 7 cm, le matériau fraisé étant traité à la mousse de bitume avec adjonction de chaux. Le matériau recyclé est ensuite recouvert par 5 cm d'enrobé bitumineux afin de garder la capacité structurelle d'ensemble de la chaussée. La profondeur de traitement ainsi que la proportion de matériaux non-bitumineux (~30 %) permettent d'assimiler cette opération à un retraitement de Classe II. Ces données, ainsi que les valeurs résultantes pour les six indicateurs définis plus haut, sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 4 – Impact sur l’environnement – Cas d’un projet de retraitement de Classe II

Description du projet	Profondeur / Epaisseur (cm)	Quantité (tonnes)	Distance de transport (km)	t.km
Solution conventionnelle				
Rabotage de la structure existante / Evacuation du fraisat	6	1 100	20	22 000
Mise en œuvre d'un nouvel enrobé	6	1 100 (10% RAP)	20	22 000
Nouvelle couche de surface	4	750	20	15 000
				59 000
Retraitement en place à l'émulsion (Classe III)				
Approvisionnement en eau	-	60	10	600
Approvisionnement en bitume	-	40	200	8 000
Approvisionnement en chaux	-	7	200	1 400
Nouvelle couche de surface	5	920 (10% RAP)	20	18 400
				28 400
Indicateurs environnementaux		Solution de base Retraitement en place		
Epuisement des ressources naturelles ADP (kg Sb equ.)	2 453	2 108	-14%	(1)
Consommation des ressources énergétiques (MJ)	1 430 149	960 509	-33%	(1)
Emission de gaz à effet de serre (kg CO2 equ.)	77 987	59 774	-23%	(1)
Consommation de granulats naturels (tonnes)	1 647	797	-52%	(2)
Consommation directe de fuel (l fuel equ.)	23 572	12 600	-47%	(2)
Transport local routier (t.km)	59 000	28 400	-52%	(2)

(1) Indicateur calculé selon les préconisations de la norme NF P 01-010 de décembre 2004
(2) Indicateur spécifique à GAlAe

8. CONCLUSIONS

Le retraitement en place à froid offre indéniablement des bénéfices environnementaux considérables. Comme le montrent les deux exemples présentés, les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la consommation d'énergie sont réduites de 20 % à 30 % alors que l'économie en granulats naturels peut facilement atteindre les 50 %. Bien qu'ils soient variables selon la localisation des chantiers et les distances aux sources d'approvisionnement, les besoins en transport et, par voie de conséquence, les coûts et les nuisances pour l'environnement qui y sont associés sont significativement réduits.

Grâce à une recherche dédiée et à un suivi continu, il a été possible de mieux appréhender le niveau de performance atteignable par des matériaux retraités en place à froid. Les principaux facteurs conditionnant cette performance ont été identifiés, ce qui a permis d'énoncer des recommandations pratiques pour l'obtention d'une meilleure efficacité. Des conditions de fraisage adaptées, un drainage correct de la structure et de bonnes conditions de mûrissement sont les principales clés pour un chantier réussi alors que des progrès supplémentaires peuvent être attendus par l'amélioration des matériels et méthodes de compactage. Nous connaissons également mieux la portée effective de nos outils de laboratoire traditionnels. Plusieurs pistes d'amélioration de ces méthodes, notamment en ce qui concerne les procédures de mûrissement des matériaux retraités à froid, ont été identifiées. Elles vont nous permettre de continuer à optimiser ces matériaux.

L'étape préalable indispensable à tout retraitement en place à froid est cependant la reconnaissance de la chaussée existante de façon à identifier clairement l'origine des désordres constatés. Un déficit structurel trop prononcé, qui nécessiterait la couverture de la couche retraitée par des épaisseurs importantes de matériaux bitumineux, peut en effet compromettre la faisabilité tant technique qu'économique du projet.

Toutes ces avancées, ainsi que le respect des limites inhérentes au procédé, devraient certainement permettre au retraitement en place à froid de conquérir l'intégralité du marché des opérations de réhabilitation pour lesquels il est adapté.

REFERENCES

1. AIPCR (2003), Recyclage des chaussées – Guides pour le retraitement en place au moyen de ciment, retraitement en place à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume, recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux. Rapport du Comité technique 7/8 « Chaussées Routières », Paris, AIPCR Ed.
2. Potti, J.J. (2007). Le projet SCORE (Superior Cold Recycling) – Bilan final. Revue générale des routes et des aérodrômes n°855. This paper summarises a series of 8 publications on the SCORE project published in the issues N°848 (April-May 2006) to N°855 (February 2007).
3. Froumentin, F., Bauer, J. (2006). Influence des conditions de fraisage sur la granulométrie du matériau recyclé. Revue générale des routes et des aérodrômes n°852.
4. Eckmann, B., Delfosse, F., Baena, J.M., Walter, J. (2006). Laboratory assessment of the curing behaviour of cold recycled bituminous materials. 4th World Emulsion Congress, Lyon. Paper 1.2 – 457.
5. Comité français pour les techniques routières (CFTR) (2003). Guide technique – Retraitement en place à froid des anciennes chaussées. Publication du SETRA, Réf. D0309.
6. Eckmann, B., Delfosse, F., Chevalier, E., Pouteau, B. (2008). Stiffness of Cold Recycled Materials. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Copenhagen. Paper 403-008.
7. Serfass, J.P., Poirier, J.E., Henrat, J.P., Carbonneau, X. (2003). Influence of curing on cold mix mechanical performance. Proceedings of the 6th international RILEM Symposium, PTEBM'03, Zürich, p. 223-229.