

## **ENROBÉS MIXTES À FROID**

G. RAYNAUD

DEMETER TECHNOLOGIES (Groupe MALET). France. graynaud@malet.tm.fr

J.F. LAFON

CETE Toulouse. France. jean-francois.lafon@equipement.gouv.fr

Y. BROSSEAUD

LCPC Nantes. France. yves.brosseaud@lcpc.fr

A. BEGHIN

MALET (Groupe MALET). France. abeghin@malet.tm.fr

### **RESUME**

Pour conjuguer qualité technique, économique et environnementale, le concepteur routier dispose d'une gamme de matériaux où les enrobés à chaud sont prépondérants, tièdes et à froid en devenir. Fondé sur la conjonction des conditions nécessaires pour harmoniser leurs complémentarités, le procédé innovant présenté dans cette communication vise la création de produits maximisés conformes aux critères du développement durable, structures performantes, coûts maîtrisés, impacts réduits des installations et chantiers. Son originalité consiste à associer, à température ambiante, deux liants, hydraulique et hydrocarboné, exclusivement à des fractions distinctes d'un mélange granulaire donné, afin d'édifier un ensemble homogène constitué d'éléments structurants collés entre eux et avec un mortier stable.

Le procédé a été éprouvé sur couche de roulement de chaussées à trafic modéré, assurant simultanément une fonction de reprofilage et de renforcement. Les propriétés mécaniques et de surface obtenues en fin d'application, comparables à celles des enrobés à chaud, ont autorisé une remise sous trafic confortable et en toute sécurité, sans période de mûrissement.

Le développement de l'article abordera l'ensemble des points concernés, en insistant notamment sur le principe, la composition et les études, les avantages techniques, économiques et environnementaux du procédé.

### **1. INTRODUCTION**

Les préoccupations des politiques routières des pays industrialisés se concentrent principalement sur la gestion du patrimoine. Les maîtres d'ouvrage sont confrontés à des contraintes et des enjeux multiples. Il faut à la fois prolonger la durée de vie des chaussées, améliorer la sécurité et le confort des usagers, diminuer la gêne provoquée par les travaux, respecter des conditions environnementales et économiques toujours plus sévères. Y répondre induit d'adapter les concepts et de mettre au point de nouveaux matériaux toujours plus en adéquation avec la demande [1].

Ainsi, le critère portant sur la dissociation des fonctions des couches de chaussées, adopté depuis plus de 15 ans, a connu un succès important pour la construction des chaussées neuves supportant des trafics élevés et lourds. On rappelle que les couches d'assise assurent les propriétés mécaniques, les couches de surface offrant les propriétés de roulement optimisées. C'est ainsi que s'est développée l'association de matériaux semi-rigides, ou à module élevé, avec une gamme d'enrobés de surface de texture ouverte, constituée de Bétons Bitumineux Minces ou Très Minces et d'Enrobés Drainants.

Aujourd'hui, indépendamment des constructions neuves où il est nécessaire d'anticiper sur une minimisation de la maintenance, le premier enjeu consiste à faire face à l'entretien d'un réseau considérable de chaussées existantes par des techniques performantes. Une même couche doit pouvoir assurer le reprofilage, le rechargement mécanique et les propriétés de surface. C'est donc vers le recours à un concept de type mono-couche multifonction que l'on doit s'orienter. Le matériau constitutif de ce mono-couche doit satisfaire à des propriétés quelque peu antinomiques : suffisamment rigide pour ne pas être déformable, suffisamment souple pour accepter des variations d'épaisseur et pour ne pas fissurer, suffisamment rugueux sans être sensible à l'arrachement, suffisamment cohésif dès la remise en circulation pour supporter les efforts de cisaillement.

La protection de l'environnement représente un deuxième enjeu, majeur et planétaire. La conférence de Paris (février 2007) a conclu à l'augmentation de la température du globe de près de 1,5°C depuis 1900, conséquence des activités humaines et plus spécialement de l'émission de gaz à effet de serre, et prévoit un accroissement de 3 à 7°C pour les 50 années à venir, selon l'évolution des pratiques industrielles et personnelles [2]. L'Union Européenne s'est engagée à les réduire, dans une proportion supérieure aux accords de Kyoto [3], et a placé la barre à un niveau deux fois inférieur. Depuis le début des années 2000, cette préoccupation a ainsi été placée au cœur des axes de travail des services de recherche et développement des grandes entreprises routières et des sociétés pétrolières. Elle a conduit au développement des enrobés tièdes, technologie permettant d'atteindre des performances équivalentes à celles des enrobés à chaud, tout en réduisant les dépenses énergétiques et les émissions gazeuses [4].

Une voie alternative radicale consiste à initier l'usage d'enrobés à froid, conservant une souplesse d'utilisation tout en visant un niveau de performances suffisamment élevé pour résister aux agressions du trafic, et ce, dès la fin de la réalisation. Il s'agit de réduire, voire de supprimer, les conséquences liées à la période de mûrissement assez longue des matériaux de ce type actuellement étudiés (enrobés à l'émulsion de bitume) [5][6].

L'idée de développer un matériau fonctionnellement mixte, intégrant un liant pouzzolanique à réactivité progressive et une émulsion de bitume, élaboré suivant un mode d'enrobage séquentiel de deux fractions granulaires (sable et gravillons) a permis de concilier l'ensemble de ces propriétés.

Ainsi, un troisième enjeu est également atteint, favoriser les économies sur les aspects :

- énergétiques : technique à froid sans chauffage des matériaux (économie de combustibles)
- environnementaux : valorisation de matériaux de qualité géotechnique modeste, disponibles en grande quantité (le liant pouzzolanique est issu de la calcination d'argile à température et durée modérées). Moindre mobilisation des ressources pétrolières (économie de bitume). Pas de rejets gazeux dans l'atmosphère par rapport aux techniques à chaud
- de réalisation : une seule et même couche, au lieu de deux couches généralement décalées pour la solution traditionnelle, d'où une moindre gêne à la circulation
- financiers : immédiat (constituants, fabrication) et à terme (entretien, réfection).

L'originalité du procédé réside dans son application à une famille de matériaux, pouvant assurer à la fois les fonctions de déflachage-reprofilage et de renforcement de chaussées et les caractéristiques de surface d'une couche de roulement.

## 2. PRINCIPE

Cet enrobé mixte à froid est donc un matériau routier à base de granulats et de liants hydraulique et hydrocarboné usuels. Le procédé de fabrication breveté [7] consiste en l'affectation des deux liants, individuellement et exclusivement, à deux fractions granulaires ciblées, selon un procédé de double enrobage générant :

- Une phase densifiante, associant le liant hydraulique à la fraction fine
- Une phase d'ossature, associant le liant hydrocarboné à la fraction grossière

Les deux phases sont préparées séparément et mélangées, de telle sorte que le squelette minéral soit formé de gravillons enrobés d'un film mince continu de bitume qui les agrège entre eux et avec le mortier durci. Un assemblage de blocs compacts est ainsi créé, dont le mécanisme de fonctionnement repose sur un système d'articulations souples. Le liant hydrocarboné est une émulsion de bitume, dont la formule est ajustée en fonction de son affinité avec les gravillons utilisés. La rupture de cette émulsion doit être semi-lente, pour favoriser sa répartition. Le liant hydraulique, à caractère pouzzolanique, composé d'argile calcinée (à 750°C pendant quelques secondes) activée par de la chaux, se présente sous forme pulvérulente. La quantité d'eau, ajoutée et provenant des granulats et de l'émulsion, est ajustée de sorte qu'elle soit majoritairement consommée par la réaction chimique du liant minéral, en vue d'obtenir une bonne tenue au jeune âge et de permettre un trafic immédiat. L'action de chaque liant s'exerce là où elle est la plus efficace. Le liant hydraulique favorise la résistance mécanique, engendrée par le blocage granulaire. Le liant hydrocarboné permet l'imperméabilisation, une relative souplesse et apporte la résistance à la fissuration.

## 3. DOMAINES D'UTILISATION

Les quantités respectives de liant hydraulique et de liant hydrocarboné sont dosées en fonction de la destination du matériau (couche de structure ou de roulement), afin d'obtenir les caractéristiques spécifiques de la couche considérée.

Dans tous les cas il faut rechercher la résistance optimum à la fissuration et à la fatigue. La compacité et l'imperméabilisation du matériau sont les caractéristiques qui s'y rapportent directement et qu'il convient de maximiser. Dans le cas des couches de roulement, de nombreux critères liés à l'état de surface sont à maîtriser, comme la résistance au déchaussement, l'usure et l'adhérence pour les véhicules. La drainabilité de surface, la résistance à l'orniérage et au fluage sont également des caractéristiques primordiales de la durabilité de cette couche. Dans le cas des couches intermédiaires (liaisons et assises), les caractéristiques mécaniques et rhéologiques sont les principaux paramètres à optimiser.

Le choix des essais permettant de mesurer les performances dépend également du domaine d'utilisation. Dans tous les cas se pose la question du choix entre des essais normalisés spécifiques aux mélanges hydrauliques et aux enrobés bitumineux. Dans le cas d'une couche de structure, son comportement mécanique se rapproche plutôt d'une grave traitée au liant hydraulique et sera évalué à l'aide d'un essai de compression diamétrale sur des éprouvettes (Diamètre : 16mm et Hauteur : 16mm - NF P 98-232-3). Dans le cas d'une couche de roulement, les essais les plus appropriés sont des essais statiques sur mélanges hydrocarbonés mesurant la résistance à l'écrasement et la stabilité à l'eau (essai Duriez : NF P98-251-4). Le comportement au compactage sera évalué à l'aide de la Presse à Cisaillement Giratoire (NF P 98-260-1). Dans tous les cas, les performances mécaniques peuvent être connues à l'aide d'un essai de module complexe

(NF P98-260-1), plus difficile à mettre en œuvre, et les résistances à la fissuration à l'aide d'un essai de retrait empêché.

#### 4. ETUDE EN LABORATOIRE – OPTIMISATION DE LA FORMULE

A ce jour, les propriétés d'usage que l'on a cherché à établir sont celles inhérentes aux couches de roulement sur des routes à trafic faible ou modéré.

Les études préliminaires en laboratoire ont permis de comprendre, et maîtriser, la succession des processus chimiques et mécaniques impliqués dans la fabrication de ce type de mélange.. Elles ont été ajustées de façon à obtenir une meilleure cohésion de surface, que l'on évaluera par la compacité et la résistance en compression. Différents paramètres ont été optimisés dans cette optique :

- la recomposition granulométrique
- Le dosage en liant hydrocarboné et hydraulique sur la fraction 0/2
- la fixation du bitume sur la fraction 2/D

##### 4.1. Influence de la recomposition granulométrique

Les granulats utilisés dans le cadre de cette étude sont des matériaux alluvionnaires de Garonne, de nature principalement siliceuse. La recomposition repose sur les fractions 0/2, 2/6 et 6/10 auxquelles il convient d'ajouter le liant hydraulique (80% passant à 63µm). Les pourcentages respectifs de ces fractions ont été modulés, de façon à obtenir les recompositions granulométriques illustrées sur la figure 1.

Tableau 1 – Pourcentage des différentes fractions de granulats

N°	0/2F	2/6,3C	6,3/10C	Liant hydraulique
1	38,5%	17%	42%	2,5%
2	24,5%	22%	51%	2,5%
3	30,5%	27%	40%	2,5%
4	34,5%	26%	37%	2,5%
5	32,5%	24%	41%	2,5%

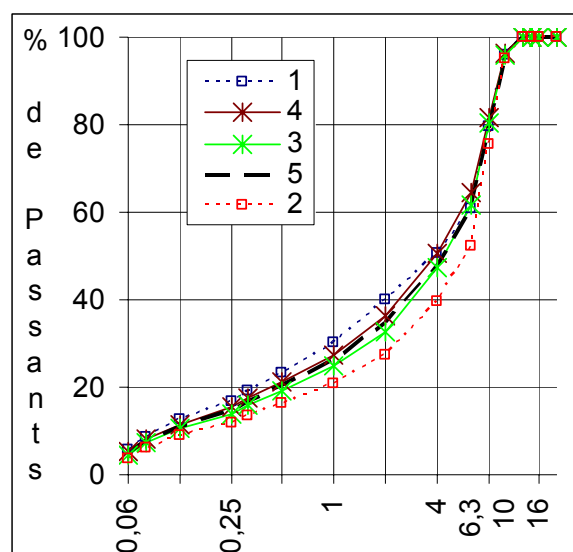


Figure 1 – Les différentes recompositions granulométriques testées

Les compacités et résistances en compression ont été évaluées à l'aide de l'essai Duriez.

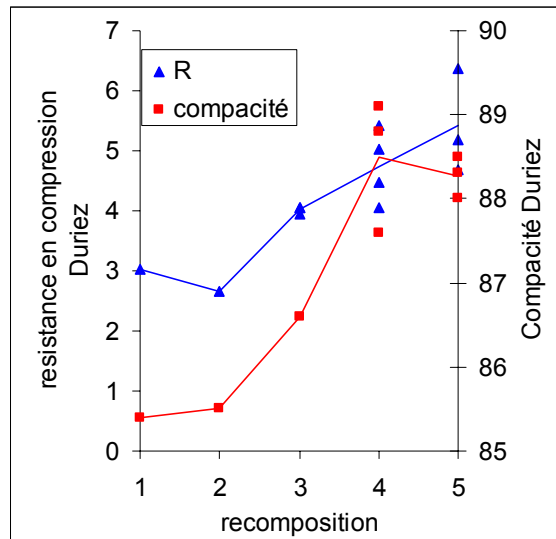


Figure 2 – Influence de la recomposition granulométrique (plusieurs teneurs en bitume)

L'influence prononcée de la recomposition granulométrique semble montrer une meilleure aptitude au compactage pour les recompositions 4 et 5, proches d'une formule de type BBSG (5) ou légèrement plus sableuse (4).

#### 4.2. Influence du taux de liant hydraulique

L'influence du taux de liant hydraulique sur les performances mécaniques de cet enrobé a été évaluée, en mesurant la résistance en compression d'une éprouvette Duriez (Diamètre = 80mm), 14 jours après confection. Ces formules sont basées sur des recompositions granulométriques de type 5 (légèrement différentes par le taux de liant hydraulique).

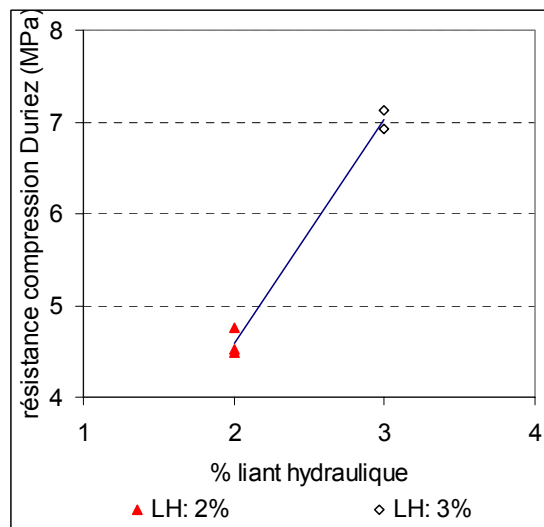


Figure 3 – Influence du taux de liant hydraulique sur la résistance en compression

Chaque point est la moyenne de 3 écrasements. Les performances mécaniques augmentent lorsque le taux de liant hydraulique passe de 2 à 3% pour une teneur en eau totale comprise entre 6,4 et 7,4%. Par ailleurs, après 14 jours il n'y a pas d'évolution sensible de cette résistance en compression.

#### 4.3. Influence de la teneur en bitume

La surface spécifique théoriquement affectée par le liant bitumineux est celle développée par la fraction 2/D. Elle est très inférieure à celle développée par la totalité des granulates

(pour les recompositions 1 à 5). La quantité nécessaire pour enrober cette fraction est inférieure à 1%. On peut néanmoins considérer qu'une partie du sable est impliquée, lors du compactage, dans une phase intermédiaire entre le mortier et le film de bitume fixé au granulat. Les teneurs en bitume résiduel sont donc optimales autour de 3,5%. Le contrôle de la teneur en bitume après désenrobage fait apparaître un déficit systématique d'environ 0,4% de bitume. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une partie du bitume est absorbée de façon irréversible par le mortier. Dans les figures suivantes, la concentration indiquée ne tient pas compte de cette perte.

Pour tester l'influence du bitume, les résistances en compression sur une éprouvette Duriez ont été mesurées en faisant varier le grade et le taux de bitume.

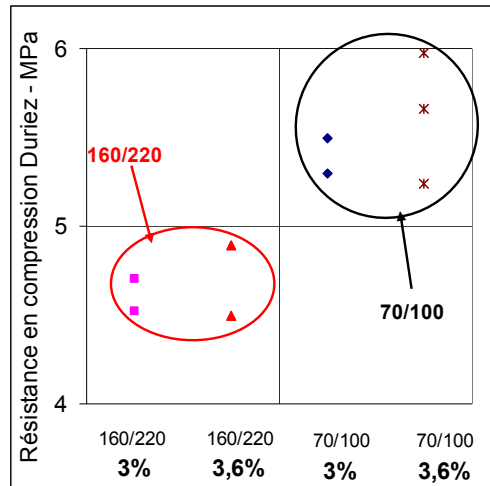


Figure 4 – Influence du bitume (grade et dosage) sur la résistance en compression

Les différents points obtenus sur la figure 4, pour une même formule, correspondent à l'utilisation de plusieurs émulsions de même grade de bitume (ces émulsions diffèrent par leurs vitesses de rupture). Chaque point est la moyenne de 3 écrasements Duriez. La résistance en compression d'une éprouvette Duriez est principalement sensible au grade du bitume. L'influence du dosage en bitume est moindre.

Le compactage a été apprécié à l'aide de la Presse à Cisaillement Giratoire. La recomposition granulométrique est la même dans toutes les formules testées, l'eau d'ajout ayant été ajustée de façon à obtenir la même quantité d'eau totale quelle que soit l'émulsion utilisée.

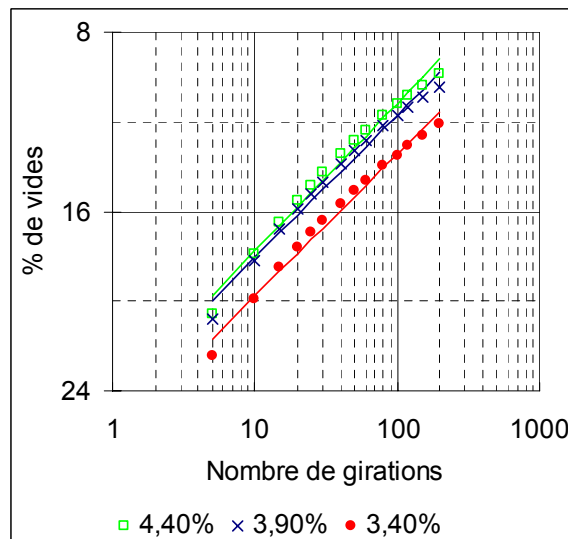


Figure 5 – Influence de la teneur en bitume sur la compacité

L'aptitude au compactage est nettement améliorée lorsqu'on augmente la teneur en bitume résiduel de 3,4% à 3,9%. Au-delà de 3,9%, l'amélioration n'est pas significative.

#### 4.4. Fixation du bitume

La fixation du bitume résiduel sur la fraction 2/D est dépendante de la rupture contrôlée de l'émulsion, en cours de malaxage. Les essais préliminaires effectués ont fait considérer la vitesse de la rupture de l'émulsion de la façon suivante :

- Une émulsion trop lente est indésirable, car elle se mélange à la fraction fine sur laquelle la rupture est quasi-immédiate (effet de la chaux), ce qui provoque la formation de boulettes de mastic
- La rupture doit être suffisamment rapide, pour permettre un enrobage de la totalité de la surface spécifique considérée
- L'émulsion doit rompre de façon à ne pas créer d'amalgames de gravillons, et permettre une répartition homogène de la phase densifiante

L'émulsion a été formulée dans ce but. L'optimisation de sa formulation est bien sûr à effectuer pour chaque nature de granulat. L'usage d'un rupteur peut être envisagé.

Cette méthodologie d'étude a permis d'optimiser les formulations des matériaux utilisés sur les 2 chantiers présentés ci-dessous. Un compromis doit être trouvé entre la résistance mécanique et la souplesse du matériau. La teneur en bitume résiduelle sera comprise entre 3 et 4%, de façon à tenir compte de l'absorption du bitume par la fraction sableuse, celle en liant hydraulique entre 2 et 3%. Les reconstitutions granulométriques mises en œuvre sont les reconstitutions notées 1 et 5 sur la figure 1 et le tableau 1. La teneur en eau optimale a été évaluée autour de 6,5%.

## 5. MATÉRIEL

Le procédé de fabrication de cet enrobé mixte repose sur l'affectation de deux liants (hydraulique et hydrocarboné) à deux fractions granulaires. La centrale utilisée, située à Portet-sur-Garonne (31), dispose de deux convoyeurs de granulats permettant cette double affectation.



Figure 6 – Centrale d'enrobage à froid avec double convoyeur

La fraction 2/D est apportée par le premier convoyeur en tête de malaxeur. L'émulsion de bitume est également introduite à ce même endroit. La durée de malaxage de ces constituants est d'environ 30 secondes (soit les 2/3 de la longueur totale du malaxeur) permettant un enrobage des granulats de très bonne qualité. Un deuxième convoyeur permet alors l'introduction d'un mortier, qui sera brassé avec le mélange précédent sur la partie restante du malaxeur (soit 1/3). Ce mortier est préalablement fabriqué à l'aide d'un deuxième malaxeur, situé au pied du convoyeur.

## 6. LES CHANTIERS

Le procédé mis au point a été expérimenté in situ par l'Entreprise Malet, sur plusieurs chantiers. Il a été procédé tout d'abord à la validation des recherches, en réalisant différentes planches sur chaussées privées fortement circulées en poids lourds, en couche de rechargement-déflachage et en couche de roulement. Leur comportement très encourageant a permis de progresser dans la connaissance du fonctionnement mécanique du procédé, et de sa tenue aux sollicitations des pneumatiques, au moyen de variations relatives et absolues des quantités de liants hydrauliques hydrocarbonés.

Après cette phase préliminaire, des chantiers publics ont été réalisés par l'Entreprise Malet, sous l'autorité de la Direction de la Voirie et des Infrastructures du Conseil Général de la Haute-Garonne. La technique a ainsi pu être éprouvée sur routes départementales, en tant que couche de roulement-rechargement sous trafic T3 à T2 soit 200 à 250 PLMJA par sens.

Deux procédures ont été lancées :

- IVOR (innovation validée par ouvrage de référence), parrainée par la DRAST en 2004 [8]
- Programme d'expérimentation, parrainé par le Sétra en 2006.

Les premiers enseignements, extraits de la réalisation de ces chantiers, montrent les évolutions qu'a subies la technique.

### 6.1. Chantier IVOR RD 20 Haute-Garonne (22 et 23 juin 2004)

#### 6.1.1. Présentation du site

Il s'agit de la RD 20, du PR 4,500 à PR 5,100 entre la commune de Saint-Caprais et la RD 29 qui comporte une ligne droite sur 450 m environ se terminant sur un carrefour. La largeur de la chaussée est de 6 m. Le trafic est de 1100 véhicules par jour, dont 18 % de poids lourd. Il s'agit d'un trafic de classe T3+, limite T2. La voie était assez dégradée. La proposition initiale prévoyait un rechargement en grave émulsion de 6 cm d'épaisseur, recouvert par une couche de roulement en enrobé coulé à froid.

La solution variante innovante retenue a consisté à appliquer le produit mixte à froid en une couche de 8 cm d'épaisseur sur la section courante, et une couche de 11 cm au niveau du carrefour et ses accès. Le tonnage prévu était d'environ 750 tonnes. Les déflexions caractéristiques étaient de l'ordre de 90 à 110 / 100<sup>ème</sup> mm. On peut considérer que le support était homogène.

#### 6.1.2. Formulation

La composition proposée a été la recombinaison 1 des études de laboratoire (voir figure 1), avec 3% de liant hydraulique et 6,25% d'émulsion à 60% (ce qui conduit à une teneur en bitume résiduel de 3,75 %). La teneur en eau totale était de 6,25%.



### 6.1.3. Caractéristiques de l'émulsion

Il s'agissait d'une émulsion cationique à 60% (pH = 1,4). La viscosité (STV 2mm 40°C – NF EN 12846) était de 36 secondes. L'émulsion était stable (IREC = 171 NF EN 13075-1).

### 6.1.4. Déroulement du chantier

#### a) Contrôles de fabrication

Les résultats obtenus ont permis de dégager les remarques suivantes :

- Compositions minérales : elles étaient relativement dispersées, et correspondaient dans l'ensemble à des ossatures sableuses (en moyenne +0,9% en fines + 2 % à 0,5 mm, + 6,9 % à 2 mm, + 10 % à 6,3 mm).
- Les teneurs en liant étaient également dispersées, mais les écarts relevés étaient comparables à ceux obtenus habituellement avec les mélanges à l'émulsion. Le dosage moyen était un peu plus faible que le théorique (- 0,15 %).
- Les teneurs en eau étaient toujours plus faibles que la théorique (-0,75 %). Ceci est habituel avec les techniques à l'émulsion. L'incidence du stockage du produit pendant quelques heures a probablement joué.

#### b) Mise en œuvre

La mise en œuvre s'est effectuée par demi-chaussée. Elle a été précédée par le répandage d'une couche d'accrochage, dosée à raison de 400 g/cm<sup>2</sup> de bitume résiduel.



Figure 7 – Mise en œuvre du chantier par demi-chaussée

#### c) Observations effectuées en cours de mise en œuvre

Le compacteur vibrant double billes de 10,5 tonnes initialement prévu n'a pas été utilisé. En effet, sous son action l'enrobé se fissurait, jusqu'à se fracturer localement. Ainsi, le matériau a été compacté uniquement par le compacteur à pneus chargé à 3 tonnes par roue, qui effectuait 12 passages. La surface présentait une texture plutôt fermée (à relier aux résultats de compositions minérales plus sableuses que prévu). Le joint longitudinal a été « écrasé » au cylindre, avant le répandage de la couche d'accrochage de la deuxième bande. Pour chaque bande, la couche était homogène sur le profil longitudinal. La montée en cohésion a été comparable à celle d'une couche en grave émulsion, ou en béton bitumineux à l'émulsion. Le produit présentait une bonne cohésion et tenue sous trafic.

#### d) Résultats de compactage

La surface était régulière en planéité, sans aucune trace de pneumatique. Les deux bandes répandues étaient identiques. La compacité moyenne était de 87,2 %, avec une dispersion très faible (écart type =1,1). Ces résultats sont de même ordre, mais légèrement supérieurs, à ceux obtenus habituellement avec les bétons bitumineux de surface à l'émulsion.

#### 6.1.5. Observations effectuées après 1 semaine de circulation

L'ensemble s'était homogénéisé, sans arrachements ni déformations, ni altérations locales.

#### 6.1.6. Profondeur Moyenne de Texture (PMT)

Les mesures, effectuées une semaine après la remise sous circulation et un an après, ont donné des valeurs suivantes :

Tableau 2 - PMT à 1 semaine et 1 an

	Sens Grenade			Sens Saint Jory			Moyenne
	TG	Axe	TD	TG	Axe	TD	
Moyenne 1 semaine	0,75	0,55	0,60	0,75	0,45	0,55	0,58
Ecart Type	0,19	0,09	0,11	0,12	0,08	0,07	0,11
Moyenne 1 an	0,70	0,55	0,60	0,70	0,65	0,70	0,65
Ecart Type	0,11	0,08	0,13	0,20	0,10	0,18	0,13

Le niveau moyen de PMT a été jugé acceptable (comparable à un BBSG), mais une forte hétérogénéité a été constatée. Des valeurs jugées limites ont été observées. Un effet de « décapage » par les véhicules s'est produit entre l'axe et les traces gauche et droite.

#### 6.1.7. Carottages après 14 jours

Les carottes ont été homogènes et d'excellente tenue, situation rarement possible avec les graves émulsion ou les bétons bitumineux à froid. Leur état a ainsi permis de mesurer leurs épaisseurs, leurs masses volumiques respectives, les résistances en compression simple et en traction indirecte.

Tableau 3 - Résistances en compression simple et traction indirecte

Résistances en compression simple				
Compacités	Fmax en KN	Hauteur en cm	Diamètre en cm	Rc en MPa
92,2	19,3	9,9	9,3	6,6
92,7	12,2	9,3	9,3	4,2
			Moyenne	5,4
Résistances en traction indirecte				
Compacités	Fmax en KN	Hauteur en cm	Diamètre en cm	Rtb en MPa
91,9	1,82	8,2	9,3	0,15
90,8	1,76	7,8	9,3	0,16
			Moyenne	0,16

Les compacités, plus élevées que celles relevées lors du chantier (méthode de mesure différente), et les résistances en compression, voire en traction indirecte, sont encourageantes.

### 6.1.8. Prélèvements à 1 an

Deux plaques d'enrobé ont été prélevées 1 an après la mise en œuvre. Sur ces plaques, il a été possible d'extraire des carottes de diamètre 80 mm et de hauteur 200 mm. Le module sécant en traction directe (15°C ; 0,02s NFP 98 260-1) a été mesuré à  $7800 \pm 300$  MPa pour une teneur en vide moyenne de 8,8%. Cette valeur situe le produit entre les matériaux hydrocarbonés à froid de type grave émulsion, de module compris entre 2000 et 3500 MPa, et les matériaux hydrocarbonés à chaud, de module plus élevé de type grave bitume (9000 MPa), et correspond en fait à un enrobé de type BBSG (5500 à 7000 MPa).

## 6.2. Chantier programme d'expérimentation RD 630 Haute-Garonne (17 octobre 2006)

### 6.2.1. Présentation du site

Sur cette section, la RD 630 est une chaussée bidirectionnelle de rase campagne en léger remblai. Elle est composée de deux lignes droites séparées par un virage peu prononcé en légère déclivité. Au cours du temps, elle a fait l'objet de plusieurs rechargements hydrocarbonés. Le trafic (comptage permanent) est de 4120 véhicules par jour, dont 12,2% de poids lourds. Il s'agit d'un trafic T2. Le support n'était pas déformé. Les essais au TUS effectués dans les deux sens ont révélé des valeurs d'orniérage aux alentours de 5 mm sur l'ensemble de la section. Les déflexions étaient très faibles et homogènes entre rive et axe ( $m + 2\sigma \approx 20/100^{\text{ème}}$  mm). Ces valeurs sont à mettre en liaison avec la nature du support en grave hydraulique. En revanche, il existait une importante fissuration de surface liée à cette structure et au vieillissement du bitume de la couche de béton bitumineux en place.



Figure 8: fissuration du support

### 6.2.2. Formulation

La formule proposée était la recombinaison 5 de l'étude laboratoire (voir figure 1), avec 2,5% de liant hydraulique et 6,7% d'émulsion à 60% (ce qui conduit à une teneur en bitume résiduel de 4 %). La teneur en eau totale était de 6,75%.

### 6.2.3. Caractéristiques de l'émulsion

Il s'agissait d'une émulsion cationique à 60 %. Le bitume de base après récupération présentait une TBA de 46,2°C, ceci confirmait le grade du bitume initial, de classe 160/220. Le point de FRAASS était d'excellent niveau (-22°C). La viscosité (STV – 2 mm 40°C) était de 34 s et paraissait bien adaptée au procédé. Cette émulsion était stable (IREC = 157) et de bonne finesse ( $d$  médian = 8,4  $\mu$ m, avec seulement 40 % de supérieur à 10  $\mu$ m).

#### 6.2.4. Déroulement du chantier

Le chantier s'est déroulé du PR 5,8 au PR 6,280. Le temps était couvert, avec une température de 18°C à 11h00.



Figure 9 – Mise en œuvre du chantier par demi-chaussée

##### a) contrôle de fabrication

Les résultats sont consignés ci-après et appellent les commentaires suivants :

- Les teneurs en fines étaient homogènes dans l'ensemble (9,1 à 10,1 %) et supérieures au théorique de 1,1 %
- Le passant à 2 mm présentait une fluctuation de 34,6 % à 40,8 %. Il était supérieur de 2 % au théorique
- Le passant à 6,3 mm était compris entre 63,7 % et 69,8 % supérieur de 3 % par rapport au théorique
- Les teneurs en eau paraissaient homogènes (6,2 à 7 %), supérieures de 0,36 % par rapport au théorique.
- Les teneurs en bitume étaient également homogènes pour ce type de produit, leur variation s'étalant de 3,4 à 3,8 %, mais la valeur moyenne après extraction prolongée était de 3,64 %, soit un déficit de 0,36 % par rapport au théorique. Cet état de fait, qui confirmait les observations du laboratoire, semble inhérent à ce type de mélange.

##### b) Mise en oeuvre

La couche d'accrochage était bien homogène, dosée à 600 g/m<sup>2</sup> résiduel et 3 à 4 litres/m<sup>2</sup> de gravillons 6/10. Le matériel d'application et de compactage était similaire à celui de la première réalisation. Le plan de compactage retenu était : 1 passe de cylindre lisse ; 4 passes de cylindre en vibration ; 20 passes de compacteur à pneus.



Figure 10: Compactage du chantier

Les résultats de compacité obtenus ont été les suivants :

Première bande (matin) Cm = 86,1 %  $\sigma = 1,1$

Seconde bande (après-midi) Cm = 85,8 %  $\sigma = 1,5$

Les valeurs étaient homogènes, de bon niveau pour un mélange à froid.

c) Observations effectuées en cours de mise en oeuvre

La centrale était réglée à 140 T/h. Le bord de bande en rive a été bien « écrasé » par le compacteur à pneu (2 passes). Le matériau était très homogène d'aspect (absence totale de boulettes de mastic) et en teneur en eau. La montée en cohésion a été très rapide. L'épaisseur foisonnée était de 9 cm en moyenne.

A la reprise de l'après-midi, un moindre ressuage d'eau, par rapport à la fin de matinée a été constaté. Après compactage, le ressuage a été jugé normal. Le joint axial a été bien réussi, même si localement on a relevé un aspect un peu « ouvert » (cloutage), dû au joint du matin non compacté sur 10 cm. Il a été noté une très bonne tenue sous trafic. La surface a d'abord semblé se fermer mais la mosaïque est rapidement apparue sous l'effet des véhicules. Malgré les arrêts de chantiers et les attentes, le matériau est resté humide et maniable. Même après un délai de 4 heures entre l'application des 2 bandes, le joint axial s'est bien fermé au compactage final.

6.2.5. Profondeur Moyenne de Texture (PMT)

Les PMT ont été mesurées après deux semaines de trafic.

Tableau 4 - mesures de PMT après 2 semaines sous circulation

	Sens Montauban / Castres			Sens Castres / Montauban		
	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
Après 2 semaines	0,48	0,78	0,56	0,51	0,78	0,61

Les résultats ont été homogènes. La macrotexture était relativement faible au jeune âge mais jugée acceptable.

### 6.2.6. Analyseur de Profil en Long (APL)

L'évaluation de la qualité de l'uni est quantifiée dans le système de Notation par Bandes d'Onde (NBO). Les résultats d'APL NBO sont synthétisés ci-après.

Tableau 5 - Profil en long mesuré avant et après travaux

Avant travaux			
Sens +	PO 96 % $\geq$ 5	Valeur moyenne : 7	Valeur minimale : 4
	MO	Valeur moyenne : 9	Valeur minimale : 8
Sens -	PO 91 % $\geq$ 5	Valeur moyenne : 6	Valeur minimale : 4
	MO	Valeur moyenne : 8	Valeur minimale : 7

Après travaux			
Sens +	PO 87 % $\geq$ 5	Valeur moyenne : 7	Valeur minimale : 2
	MO	Valeur moyenne : 8	Valeur minimale : 7
Sens -	PO 100 % $\geq$ 5	Valeur moyenne : 7	Valeur minimale : 5
	MO	Valeur moyenne : 8	Valeur minimale : 5

Partant d'un support d'un bon niveau d'uni, il n'a pas été noté d'amélioration, les valeurs moyennes étant du même ordre et les valeurs minimales altérées par les derniers mètres du chantier, à la jonction avec la section adjacente. Le niveau atteint a été considéré comme correct en section courante.

### 6.2.7. Mesures d'adhérence

Elles ont été effectuées par la remorque ADHERA du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux dans les deux semaines suivant la réalisation.

Les Coefficients de Frottement Longitudinal (CFL) obtenus ont été les suivants :

Tableau 6 - Mesures d'adhérence

		Fuseau national tous revêtements	Enrobé Mixte à froid
CFL	40 km/h	0,36 – 0,70	0,61
CFL	60 km/h	0,25 – 0,55	0,41
CFL	80 km/h	0,17 – 0,44	0,29

Dès le jeune âge, la couche de roulement a présenté une bonne microtexture, son niveau de macrotexture étant sensiblement situé à la moyenne du fuseau national.

### 6.3. Bilan des chantiers

La réalisation du chantier de la RD630 a permis de mettre en application les enseignements tirés de l'observation du chantier de la RD20, lequel, 3 ans après sa mise en œuvre, présente un comportement sous trafic unanimement jugé satisfaisant. Les observations effectuées lors de ces réalisations ont permis de valider le concept de cet enrobé mixte sur chaussées à trafic modéré [8]. Présentant un comportement significativement différent des mélanges à froid uniquement hydrocarbonés, il est comparable à un BBSG, sans altérer l'absorption de variations significatives d'épaisseur.

Son comportement au jeune âge s'est avéré satisfaisant et son exploitation s'effectue dans de bonnes conditions. Un suivi régulier permet d'évaluer au cours du temps l'évolution de la macrotecture, de l'adhérence, des profils en travers et surtout de la fissuration, notamment lorsque le support est de nature hydraulique où le risque de remontée de fissure est important.

## 7. CONCLUSION

L'industrie routière est inexorablement engagée dans une démarche de mise en conformité avec les exigences du développement durable, évolution soutenable dans une stratégie de long terme qui concilie progrès technique, économique et social et préservation de l'environnement. Elle s'y intègre sans ambiguïtés, en insérant le passage des techniques à chaud aux techniques à froid, incluant les enrobés tièdes, dans une progression compatible avec les impératifs des acteurs concernés. Dans ce contexte, le concept présenté relève d'un saut technologique important, dont les objectifs s'appuient sur un compromis permettant de conserver les avantages des mélanges à froid, de parvenir à un niveau de performances comparable à celui des mélanges à chaud, dans des conditions économiques favorables.

Les études de laboratoires et les planches expérimentales ont conduit à la réunion de propriétés quelque peu antinomiques, obtenues par une mise au point précise des composants en terme de nature (usage de liants aux performances complémentaires), de dosage et de séquences de préparation des mélanges, leur permettant de satisfaire à la fois à la rigidité et à la souplesse.

S'il est indispensable d'optimiser les acquis, afin de maîtriser le concept dans toutes les applications possibles quelles que soient les conditions d'usage de l'ouvrage, ce matériau est d'ores et déjà exploitable, que ce soit dans les pays industrialisés, émergents ou en voie de développement.

## REFERENCES

1. Brosseaud, Y. (2005). Bilan historique de l'innovation routière en France de 1992 à 2002. Une longue expérience partenariale. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N° 834, pages 22-32
2. Conférence internationale sur le réchauffement climatique. Paris. Principales conclusions du 4ème rapport scientifique du GIEC publié le 2 février 2007. [www.effet-de-serre.gouv.fr](http://www.effet-de-serre.gouv.fr)
3. Le plan de lutte contre les gaz à effet de serre GES. Les accords de Kyoto. 1997. <http://sages.free.fr/>
4. Brosseaud, Y. (2006). Ecologiques, sécuritaires, confortables, les enrobés de demain se feront autrement : présentation des enrobés tièdes. 7ème congrès National de la Route. Ouarzazate. 9-10 novembre 2006. Maroc.
5. B. Eckmann, J.-J. Potti, M. Bourrel, P. Verlhac, C. Such, F. Leal Calderon, J. Sanchez Polo. Technologie à froid : les enseignements du projet Optel. Revue Générale des Routes et Aérodrômes n°792. février 2001.
6. J.-J. Potti, D. Lesueur, B. Eckmann. Vers une méthode rationnelle de formulation des enrobés à froid : les apports du projet Optel. Revue Générale des Routes et Aérodrômes n°805. Avril 2002.
7. Raynaud, G. brevet WO 2004/048701 A1. Procédé de fabrication, notamment à froid, d'un enrobé, et enrobé obtenu par la mise en œuvre du procédé. 20 novembre 2003
8. [http://www.recherche-innovation.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Fiche\\_IVOR\\_05.1\\_cle24a4b4.pdf](http://www.recherche-innovation.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Fiche_IVOR_05.1_cle24a4b4.pdf)  
Label Comité IVOR.