

LES ENROBES DE DEMAIN SE FERONT-ILS AUTREMENT : ETAT DU DEVELOPPEMENT DES ENROBES TIEDES EN FRANCE.

Y. BROSSEAUD

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) - Nantes. France.

yves.brosseaud@lcpc.fr

M. ST JACQUES

Ecole Technique Supérieure (ETS) - Montréal. Canada. Michele.St-Jacques@etsmtl.ca

RESUME

Les préoccupations des politiques routières des pays industrialisés se concentrent sur l'amélioration de la sécurité des usagers et sur le confort des déplacements routiers, mais également sur la protection vis-à-vis des populations riveraines, des travailleurs et d'une façon plus générale sur l'environnement.

L'article se propose de dresser un bilan sur les recherches en cours concernant les enrobés à chaud, faits autrement, pour satisfaire les exigences environnementales, les réductions de consommation énergétique, tout en permettant un développement durable de ces enrobés. Après avoir défini la terminologie décrivant ces enrobés d'assise et de surface, les principes généraux des différents procédés d'élaboration d'enrobés bitumineux tièdes sont présentés. La gamme de ces enrobés recouvre les techniques dites semi-tièdes (température de sortie centrale inférieure à 100°C) et les techniques dites tièdes (température de sortie centrale supérieure à 100°C, avec une réduction de 20 à 40°C par rapport aux enrobés à chaud traditionnels). Les caractéristiques et les performances mécaniques et environnementales attendues de ces enrobés sont passés en revue. Des résultats d'entreprises et quelques suivis réalisés par le Réseau Scientifique et Technique (RST) portent sur des études comparatives en laboratoire et sur le comportement sur chantier au jeune âge.

1. INTRODUCTION

Les préoccupations des politiques routières des pays industrialisés se concentrent sur l'amélioration de la sécurité des usagers et sur le confort des déplacements routiers, mais également sur la protection vis-à-vis des populations riveraines, des travailleurs et d'une façon plus générale sur l'environnement. Cette amélioration passe par un choix judicieux des structures (durabilité), mais surtout de la nature de la couche de roulement, qui permet d'offrir une combinaison des meilleures conditions d'adhérence tout en autorisant une baisse significative du bruit de roulement et un meilleur partage de l'espace mis à la disposition des divers usagers de la route.

La planète se réchauffe, nous en sommes tous bien conscients. En France, la tempête de 1999, ou la canicule de l'été 2003, sont les signes avant-coureurs des changements dramatiques qui se profilent. 2006 l'année de tous les records, la température moyenne de 14,6°C est la plus élevée jamais enregistrée sur la planète. Ces 10 dernières années, les catastrophes climatiques ont fait 0,9 million de morts, 2,6 milliards de personnes touchées, des pertes financières dépassant les 210 milliards de dollars. Les scientifiques en climatologie, nous prévoient une baisse de la surface de la banquise de 40%, une hausse du niveau des eaux, ayant pour conséquence : 1,2 milliard de personnes touchées, 200 millions de réfugiés climatiques à l'horizon 2050. Il y a urgence et nous devons agir et réduire de façon importante, nos émissions, d'abord pour les stabiliser à l'horizon 2010, ensuite pour les diviser par quatre, à l'horizon 2050 [1].

Face à ce défi énergétique, le Plan Climat 2004 [2] répond à l'objectif de Kyoto, et va même au-delà: l'ensemble de ces mesures représente une économie de 72 millions de tonnes de CO₂, principal gaz à effet de serre (au lieu des 54 millions envisagés), chaque année et à l'horizon 2010. Plus récemment, le sommet européen de Bruxelles, de mars 2007, a fixé les objectifs de réduction des émissions de CO₂ à hauteur de 20%, à l'échéance de dix ans.

La prise en compte des enjeux environnementaux se généralise, imposée par le défi climatique et l'augmentation de la demande en matières premières et en énergie. Aussi, depuis le début des années 2000, cette préoccupation de protection de l'environnement a été placée au cœur des axes de travail des services de recherches et développement des grandes entreprises routières et des sociétés pétrolières. La mise au point des enrobés bitumineux tièdes représente une étape importante de ce programme et se veut une concrétisation opérationnelle des démarches de développement durable et de protection efficace de l'environnement [3], [4], [5]. L'article se propose de décrire les différents procédés, de dresser un bilan sur les recherches en cours concernant les enrobés bitumineux tièdes et semi tièdes.

2. POURQUOI DES ENROBES TIEDES : MODE OU NECESSITE

Les enrobés bitumineux tièdes visent à une :

- diminution des nuisances (fumées, odeurs, gaz) tant à la fabrication, qu'à la mise en œuvre,
- limitation de la production des gaz à effets de serre (GES),
- réduction de la consommation énergétique lors du séchage partiel des granulats,
- diminution des émanations de vapeurs, particulièrement importantes dans les espaces confinés peu aérés (tunnels, stationnements étagés et/ou intérieurs, centre-ville ...).

Ils participent pleinement à la politique générale à laquelle se sont engagés les pays signataires du protocole de Kyoto. Les entreprises routières ont développé des innovations techniques conduisant à produire des enrobés plus "écologiques", opérationnels pour contribuer à cet effort de protection de l'environnement

Le principe général des enrobés tièdes vise à baisser la température d'enrobage, tout en conservant la maniabilité du mélange pour le répannage et le compactage. Il s'agit de trouver un procédé de fabrication compatible avec les centrales de fabrication actuelles, pour maintenir artificiellement la viscosité du liant, durant toute la période d'application. Celle-ci peut être étendue d'environ 2 heures, tout en permettant un compactage efficace (teneur en vides conformes aux spécifications) et une bonne mise en place de l'enrobé (texture, uni, homogénéité,...).

Les enrobés tièdes ne suivent donc pas une mode passagère, mais répondent bien à une réalité d'aujourd'hui et demain, de pouvoir réaliser des enrobés performants et adaptés aux fortes contraintes des chaussées modernes, tout en privilégiant le respect de l'environnement et en réduisant les coûts énergétiques souvent reprochés aux enrobés à chaud.

3. TERMINOLOGIE – DEFINITION - TENTATIVE DE CLASSIFICATION

Les enrobés bitumineux tièdes se composent d'une famille d'enrobés préparés à chaud, dont la température de sortie fabrication (au niveau du malaxeur) varie entre 80°C et 130°C, selon différents procédés de mélange. Ces produits respectent les normes ou

spécifications correspondant à la classe de produits bitumineux auxquels ils font référence (par exemple les enrobés semi grenus : NF P 98-130).

La température de fabrication (sortie centrale) et de répandage constitue un des moyens de classer les produits bitumineux en :

- mélanges à froid (température < 60°C), comprenant principalement les enrobés bitumineux à l'émulsion ou à la mousse de bitume,
- mélanges enrobés tièdes ou semi tièdes (entre 60°C et 130°C), définit selon que la température en sortie de centrale est :
 - o en dessous de 100°C (température d'évaporation de l'eau), que l'on désignera respectivement par les enrobés semi-tièdes
 - o au dessus de 100°C, désignés sous le vocable d'enrobés tièdes.
- mélanges enrobés à chaud traditionnels (> 130°C).

Par simplification, dans la suite de l'exposé, on désigne sous le terme enrobé tiède l'ensemble de ces deux «sous familles».

On rappellera que l'enrobage traditionnel à chaud permet par l'effet de la température de disposer de conditions inter-faciales autorisant une adhésion efficace et durable entre le bitume et les granulats. Pour ce faire, les granulats sont déshydratés et chauffés à une température supérieure à 170°C. Le bitume doit avoir une viscosité d'enrobage inférieure à 150 cSt ; soit une température comprise entre 120 et 180°C selon son grade (10/20 à 70/100 pour la France). La température de fabrication des enrobés à chaud se situent donc entre 130 et 180°C.

Les techniques d'enrobage tièdes font appel aux trois processus suivants :

- sans ajouts majeurs (autres que des agents moussants ou d'adhésion) où le procédé consiste en la maîtrise de la teneur en eau sous forme de vapeur dans le mélange final,
- enrobage séquentiel, ou multiple, avec ou non usage de mousse de bitume,
- avec ajouts de nature à modifier la viscosité du bitume (liant spécial, additif apportant de l'eau ou maintenant l'eau résiduelle, paraffines ou dérivés).

Certains procédés associent deux de ces principes (par exemple : mousse de bitume et filler hygroscopique).

Le cahier des charges initial des enrobés tièdes, ayant retenu un certain consensus de la communauté routière, prévoyait d'enrober autrement qu'à chaud tout en maintenant :

- un enrobage complet et uniforme,
- un liant sans agents fluxants ou fluidifiants d'origine fossile,
- des propriétés mécaniques nominales dès la fin de la mise en œuvre,

par un abaissement des températures de fabrication et de compactage, selon un procédé capable de maîtriser la viscosité du liant, jusqu'à la fin de la mise en œuvre.

Les enrobés tièdes sont conformes aux normes françaises (bientôt européennes, d'application française au 1/1/2008) sur les enrobés à chaud [6], [7] et doivent respecter les propriétés en laboratoire (caractéristiques mécaniques et d'état) et sur chantier (texture, teneur en vides, épaisseur). L'étude de laboratoire suit le même cheminement : même niveau, mêmes essais et les mêmes spécifications que les enrobés à chaud. Sur chantier, la seule différence concerne le respect des conditions de températures qui doivent être précisées dans la fiche technique du procédé de l'entreprise. Il n'est pas prévu de norme spécifique sur les enrobés tièdes tant au niveau français, qu'europpéen. Ces techniques d'enrobés tièdes sont également en cours de développement dans quelques pays européens.

4. DESCRIPTION DES PRINCIPALES TECHNIQUES

Le principe des enrobés tièdes est de pouvoir trouver un moyen de diffuser le bitume dans le squelette minéral et conserver une bonne maniabilité et compactabilité par :

- effet de plastifiant du bitume par des ajouts, stables aux températures de service de la chaussée,
- effet de "soupe", "moussabilité", mise en émulsion inverse, par une bonne maîtrise de l'eau lors de la phase d'enrobage, tout en conservant cet effet à l'application,
- effet de double enrobage (exemple : bitume mou enrobage classique et bitume dur injecté en mousse) ou enrobage séquentiel,
- effets des propriétés spécifiques des liants par exemple liant spécial ou liant de synthèses d'origine végétale,

Une variante des enrobés semi-tièdes, est le réchauffage de béton bitumineux à l'émulsion de bitume (procédé Ecomac). Ce procédé de «tièdissement» d'enrobés à froid vise à l'amélioration de la maniabilité et donc à l'augmentation des propriétés mécaniques et de résistances de surface à l'arrachement. Ce procédé permet une meilleure maîtrise de la mise en œuvre et de l'homogénéité du revêtement. Dans la suite de cet article nous nous limiterons essentiellement aux enrobés tièdes.

Tableau 1 - Désignations et principes des enrobés tièdes utilisés en France

Technique	Nom	Entreprise	Principe de fabrication
Ajout bitume	SASOBIT	Allemagne	Squelette chaud + bitume + paraffines ou cires (bas poids moléculaire)
Ajout malaxeur	ASPHA-MIN	EUROVIA	Squelette chaud + zéolites + bitume
Bitume spécial	3 E – LT ECOFLEX	Groupe COLAS SCREG	Squelette chaud + bitume spécial (prêt à l'emploi)
Liant spécial	VEGECOL	Groupe COLAS	Squelette chaud + liant de synthèse d'origine végétal
Double enrobage	WAM FOAM	SHELL – (Pays Bas et Italie)	Squelette chaud + bitume mou + bitume dur en mousse
Double enrobage	3 E - DM	Groupe COLAS	Squelette chaud + bitume mou + bitume en mousse
Double enrobage	LT asphalt	NYNAS – (Pays Bas)	Squelette chaud + filler hygroscopique + mousse de bitume
Enrobage séquentiel	3 E - DB	Groupe COLAS	Squelette chaud + bitume mou + bitume dur
Enrobage séquentiel	EBE (LEA) – enrobés basse énergie	FAIRCO	Gravillons chauds + bitume + sable humide
Enrobage séquentiel	EBT (LEA) – enrobés basse température	EIFFAGE TP	Squelette partiellement chauffé (95°C) + bitume ou Gravillons chauds + bitume + sable humide
Enrobé à froid tièdi	ECOMAC	SCREG	Squelette froid + émulsion + réchauffage

Les procédés d'enrobés tièdes (ou semi-tièdes) développés et utilisés en France sont récapitulés au tableau 1, en fonction d'une classification selon le procédé de fabrication. On trouvera le nom commercial du produit et l'entreprise routière ou pétrolière à l'origine de son développement. Les techniques et procédés originaux sont brevetés par les entreprises.



Ecomac : tambour «tiédisseur», application en couche de roulement sur route à trafic moyen, noter l'absence d'émission (crédit photo: Y. Brosseaud LCPC)

Les principes d'enrobage sont décrits succinctement dans ce paragraphe. Pour plus de détails, le lecteur se reportera aux communications diffusées par les entreprises (voir bibliographie).

Le **procédé Sasobit** consiste à "ramollir" le liant par fusion de cires (100°C) et solubilisation au bitume (115°C). Le bitume ainsi "plastifié" est préparé par un mélangeur en ligne (4 à 5 % de Sasobit). Ce liant prêt à l'emploi peut être utilisé sur tout type de centrale, sans modification. Il permet la fabrication des enrobés à une température moyenne proche des 130°C (soit des températures inférieures de 30 à 40°C par rapport à l'enrobé classique à chaud). Il autorise un compactage efficace jusqu'à 80°C. L'enrobé présenterait un bon comportement aux basses températures et une meilleure résistance à l'orniérage. Cette technique est surtout employée en Allemagne. En juin 2005, une évaluation en laboratoire de cette technique a été pratiquée par le National Center of Asphalt Technology (NCAT) [8].

Le **procédé Low Temperature Asphalt** (LT Asphalt) [9] repose sur l'enrobage du squelette minéral porté à 90°C, par de la mousse de bitume. Un filler hygroscopique (0,5 à 1% du mélange) retient l'eau résiduelle contenue dans les fractions minérales non déshydratées, et permet de maintenir une bonne compactabilité du mélange. Cette technique est encore en cours de développement dans les laboratoires de recherche aux Pays Bas. On recense quelques applications.

Les **enrobés tièdes à base de Zéolithe** : les **enrobés à l'aspha-min** sont développés depuis plus de 4 ans [10]. La zéolithe utilisée est de l'aspha-min, composée de cristaux de silicate d'alumine hydratés, se présentant sous la forme d'une poudre. En présence des granulats à 130°C, la zéolithe (dosée aux environs de 0,3% du mélange) libère son eau cristallisée (taux d'eau cristalline environ 20%), produisant vapeurs et expansion sous forme de mousse du bitume chaud, favorisant enrobage et maniabilité. Cet additif réduit la température de fabrication des enrobés de l'ordre de 30°C. Une évaluation de cette technique en laboratoire a été pratiquée par le National Center of Asphalt Technology (NCAT) [11].



Application d'enrobés tièdes à l'aspha-min ESG-10 PG 70-28, rue Bali à Montréal (Canada), août 2005 (crédit photo :Y. Paquin DJL - EUROVIA)

Le **procédé Enrobé à Basse Température - EBT** (Low Energy Asphalt - **LEA** pour l'export) est fabriqué selon deux procédures spécifiques de séchage :

- tous les granulats sont chauffés à seulement 95°C (procédé α),
- une partie des granulats est déshydratée et chauffée à 130°C et l'autre partie à température ambiante et à humidité contrôlée, est introduite par un circuit adapté (anneau recycleur, tapis lanceur, dans le malaxeur) (procédé β).

Dans le malaxeur de l'eau est ajoutée pour avoir une teneur en eau totale proche de 1,5%, puis le bitume chaud est injecté. L'eau résiduelle fait mousser naturellement le bitume, créant spontanément l'auto-expansion du bitume, favorisant l'enrobage des granulats. L'enrobé tiède est ainsi préparé à une température de 90°C. Un additif améliorant la maniabilité et la qualité de l'adhésion est parfois ajouté avec certains granulats. Ce procédé ne nécessite que des adaptations mineures sur les centrales : montage d'une rampe à eau dans le malaxeur, équipée d'un débitmètre. Actuellement une quinzaine de postes sont équipés de ce dispositif. Le compactage demande une énergie légèrement supérieure à celle des enrobés à chaud classiques. La température de compactage est comprise entre 70 et 90°C [12], [13].



EBT : application de 4500 tonnes d'enrobés tièdes BBA 0/10, aéroport de Candillargues (Dpt 34) (crédit photo : société EIFFAGE Travaux Publics)

Le **procédé Enrobé à Basse Energie – EBE** (encore désigné Low Energy Asphalt - **LEA** pour l'export), constitue le premier procédé selon la méthode des enrobés semi-tièdes (en dessous des 100°C), dont l'originalité consistait à l'introduction du sable humide après enrobage des gravillons secs par le bitume [13], [14]. La réussite du procédé réside dans

la maîtrise de la teneur en eau finale de l'enrobé semi-tiède, pour conserver pendant une durée suffisante, sa maniabilité au compactage. Le principe apparaît très simple, mais encore fallait-il y croire et travailler sur le mode d'introduction du sable humide, et par conséquent prévoir quelques modifications du poste d'enrobage [12]. Le procédé EBE privilégie l'approche thermodynamique, sans délaisser l'aspect physico-chimique [13]. Les gravillons sont déshydratés et chauffés à 130°C et mélangés avec le bitume chaud, puis le sable est introduit à température ambiante, son humidité étant ajustée pour que le mélange final soit à une teneur en eau voisine de 0,5%. Ainsi, le procédé mobilise successivement les propriétés du bitume selon différents états : à chaud et donc à faible viscosité pour bien enrober les gravillons déshydratés, sous forme expansée (ou mousse) et d'émulsion, lorsque ce bitume chaud en excès pour les gravillons, est mis en contact avec l'eau libre du sable. Un additif (0,3 à 0,4% du poids du bitume) est ajouté lors de la fabrication pour favoriser l'adhésion (de certains granulats peu adhésifs) et la moussabilité du liant. Cette technique permet donc la fabrication des enrobés à une température voisine de 90°C et son application entre 60 et 90°C.

Des calculs de déperditions thermiques, validés par des expérimentations, ont montré que la vitesse de refroidissement des enrobés à basse température était beaucoup plus faible que celle des enrobés classiques à chaud (130-140°C) et que la période de mise en œuvre (et par conséquent de compactage) était rallongée [15].



Malaxage en laboratoire très peu d'émission de poussières, matériau foisonné avant essai PCG absence de fumées, quelques légères vapeurs d'eau.

(crédit photo de laboratoire : D. Sicard LROP)

Les **procédés 3 E – Enrobés Environnementaux Economes en Energie (3E)** - sont le fruit de la recherche et de l'expérience de l'entreprise dans le domaine des enrobés tièdes [16], [17]. Le cahier des charges associé à ce programme de recherche, prévoyait des produits de performances comparables aux enrobés traditionnels, capables d'abaisser de 40°C les températures de fabrication et de mise en œuvre, tout en utilisant tous les types de centrale d'enrobage, sans modifications ou avec des adaptations à la marge. Les travaux de recherche ont conduit à une gamme de 3 produits dont les caractéristiques communes sont conformes au cahier des charges, soit une mise en œuvre entre 80 et 110°C.

Procédé 3E "DB" : le double enrobage du bitume est réalisé séquentiellement par deux types de bitume de pénétrabilité différente, pour ajuster la viscosité du liant final. Les granulats sont déshydratés et chauffés vers 125°C, puis enrobés d'abord avec le bitume mou, puis avec le bitume dur. La pénétration finale du liant étant choisie en fonction de l'usage.

Procédé 3E "DM" : l'enrobage est réalisé séquentiellement. Les granulats déshydratés et chauffés vers 125°C, sont enrobés par un premier bitume chaud, puis subissent un second malaxage avec de la mousse de bitume dont le grade est adapté au produit final désiré.

Procédé 3E "LT" : l'enrobage s'effectue de manière traditionnelle, à l'exception de la température de chauffage, toujours maintenue autour de 125°C. Le liant "LT", modifié par des additifs est spécialement conçu dans les usines du groupe. Il est pulvérisé sur les granulats.

Le **procédé Wam Foam** résulte des recherches développement conduites par une société pétrolière [15]. Le principe d'enrobage repose sur trois étapes successives associant un bitume mou et un bitume dur. Les granulats sont déshydratés et chauffés à 110 - 120°C pour être pré-enrobés par un bitume mou (généralement 300 de pénétrabilité), favorisant un très bon mouillage et une adhésion des différentes fractions minérales. Un second enrobage par de la mousse de bitume de grade dur complète la fabrication. Le malaxage de la mousse de bitume dur et des granulats pré-enrobés de bitume mou, favorise le processus de recombinaison des bitumes (application de la théorie de mélange). L'aménagement des centrales d'enrobage est assez réduit. La fabrication de la mousse nécessite une bonne extraction d'air. Un dispositif de nettoyage des buses placées dans le malaxeur utilise un système d'air comprimé.

5. DEVELOPPEMENT DES PRODUITS

5.1. Les réalisations

Il est toujours très difficile d'obtenir des chiffres suffisamment précis pour évaluer les évolutions des procédés. Cependant, les ordres de grandeur fournis par les entreprises permettent de les situer dans un contexte général et par conséquent d'en appréhender leur degré de développement.

Les études et recherches ont démarré, dans les laboratoires, durant la période comprise entre les années 2000/03.

Les premières expérimentations se sont déroulées entre 2002/05 selon le stade d'avancement des différents procédés.

A ce jour, les réalisations sont déjà nombreuses en terme de chantiers et parfois en tonnage, comme l'indique les données qui ont été communiquées par les entreprises routières. Ils concernent :

- **Enrobés tièdes à l'aspha-min** : plus de 120 références en août 2006, soit près de 180 000 t appliquées depuis 2004, dont près de 100 000 t réalisées pour l'année 2006, et ce, dans différents pays : France 75%, Allemagne, Croatie, Canada, USA.
- **EBE** : les modifications apportées sur une centrale en région parisienne sont opérationnelles depuis le milieu de l'année 2005. Des expérimentations ont été réalisées en 2006 aux USA.
- **EBT** : la technique est considérée comme opérationnelle depuis 2005. On recense plus d'une quinzaine de centrales équipées pour produire cet enrobé, et une dizaine de réalisations soit environ 2 à 3 000 t, pour l'année 2005. Le dernier bilan dressé fin 2006, sur les techniques EBE et EBT fait état de la réalisation de 70 chantiers et près de 40 000 t d'enrobés tièdes produites.
- **3 E et ECOFLEX** : le bilan de l'expérience du groupe en 2005, fait état d'une dizaine de chantiers réalisés, soit environ 5 000 t d'enrobés 3 "E" mises en œuvre, toutes

techniques confondues. Des réalisations en nombre important ont été faites en 2006, principalement selon la technique LT.

- **Sasobit** : pas d'application recensée en France, des réalisations aux Pays Bas et en Allemagne (pas de données collectées dans le cadre de ce bilan).

- **Wam Foam** : quelques expérimentations en Italie dont une importante en 2006 en couche de liaison sur 3,5 km d'autoroute (pas de données collectées dans le cadre de ce bilan).

Ces chiffres montrent, s'il en était besoin, le degré de développement avancé des techniques d'enrobés tièdes.

5.2. Typologie d'enrobés fabriqués selon ces procédés tièdes

Les enrobés traditionnels épais semi-grenus (BBSG), appliqués en couches de surface (liaison et roulement), et fabriqués selon des compositions granulométriques continues et des bitumes purs classiques (grade 35/50), ont été testés avec succès, suivant les différents procédés décrits ci avant (réalisations françaises).

L'usage d'enrobés structurants traditionnels, de type grave bitume, ne pose pas de difficulté particulière pour leur fabrication et mise en œuvre en assise de chaussée. Toutefois, selon le principe de précaution, et en attente d'évaluation mécanique sur le long terme, certaines entreprises se montrent prudentes, et n'envisagent pas pour le montant d'employer des matériaux structurants tièdes. D'autres proposent ces techniques tièdes pour des structures supportant des trafics lourds importants.

L'usage de bitume dur (10/20 ou 20/30) pour la fabrication des enrobés à module élevé (EME), en renforcement de chaussée, a été testé avec succès, entre autres, avec les procédés EBE, EBT et aspha-min.

Des essais de préparation avec des matériaux recyclés à des taux compris entre 10 et 30% ont été effectués avec certains procédés et se sont avérés positifs.

De même, des enrobés aux liants modifiés par des polymères ont également été produits avec certains procédés tièdes, avec succès. Les performances obtenues en place sont annoncées comparables à celles des mêmes enrobés aux liants polymères à chaud (sachant que la viscosité de ces liants étant plus élevée la température d'enrobage est légèrement plus forte).

Une question se pose : sera-t-on capable de produire l'ensemble des enrobés à chaud selon ces procédés tièdes ?

Selon certaines informations provenant de la profession routière, il semblerait que tous les types d'enrobés bitumineux, d'assises de chaussées ou de couches de surface, puissent être préparés selon les modes de préparation des enrobés tièdes. Toutefois, cette affirmation reste à confirmer par les expérimentations, notamment en ce qui concerne les enrobés très minces (BBTM) en 2 cm d'épaisseur, et les enrobés drainants. On rappellera, qu'actuellement ces deux procédés ne sont pas réalisables selon la technique des enrobés à froid à l'émulsion.

Mais doit-on rechercher systématiquement une substitution complète des enrobés à chaud par les enrobés tièdes ?

La question doit être examinée, et la réponse doit être nuancée. Les estimations de réduction de CO₂, principal gaz constituant les gaz à effet de serre, tant préjudiciable au réchauffement planétaire, seraient voisines de 400 000 tonnes pour l'ensemble de la production française d'enrobés à chaud (environ 45 millions de tonnes). Le recours même partiel à ces procédés tièdes aurait un effet bénéfique et significatif, sur la diminution des GES, dans le domaine de travaux routiers. Cette situation pourrait valoir d'exemple et d'encouragement pour les autres branches des travaux publics, à développer des techniques « éco-durables » tant recherchées par les politiques de développement.

5.3. Promotion des innovations d'enrobés tièdes

Dans le but d'inciter les entreprises à innover, des chartes innovations sont signées et se soldent par l'établissement de certificats, et des récompenses sont attribuées lors de concours sur l'innovation dans le domaine des travaux publics.

Une charte innovation autoroutière s'est soldée par l'obtention d'un certificat, délivré en 2006, attestant que "le procédé testé (enrobés tièdes à l'aspha-min) sur un enrobé épais (BBSG 0/14) et un enrobé mince (BBM 0/14), conduit à un abaissement de la température de séchage des granulats de 30°C, dans le malaxeur lors de l'enrobage par le bitume. Le bilan s'avère probant vis-à-vis de l'objectif de réduction de la température d'enrobage tout en conservant les caractéristiques de l'enrobé à chaud. Il permet de diminuer notablement la consommation énergétique et les nuisances associées à l'émission de fumées et de poussières dans l'atmosphère. Il contribue à réduire sensiblement les GES".

De même, des concours sur la promotion de l'innovation [18], organisés par la profession des travaux publics et par des maîtres d'ouvrage, ont primé des techniques d'enrobés tièdes, comme :

- les enrobés tièdes à base d'aspha-min,
- les enrobés basse énergie : procédé "EBE".

Ces reconnaissances attestent d'un développement certain et d'un comportement satisfaisant, tout au moins à court terme, des techniques primées.

6. PREMIERS BILANS

D'une manière générale, les résultats présentés dans cette synthèse proviennent principalement de données communiquées par les entreprises. Les quelques réalisations suivies par le RST conduisent aux mêmes tendances. Un échantillonnage plus important et portant sur l'ensemble des techniques s'avère nécessaire pour disposer d'un avis circonstancier.

6.1. Bilan environnemental : températures de fabrication, émissions

Les gains énergétiques dus aux réductions de la consommation de fuel pour le séchage des matériaux sont de l'ordre de 1 à 1,5 litre par tonnes pour les procédés tièdes, et de près de 1,5 à 3 litres par tonne pour les procédés semi tièdes. Dans ce cas, l'économie porte sur l'énergie non consommée pour la vaporisation de l'eau. On rappelle que la chaleur latente de vaporisation de l'eau (537 kcal/kg) représente 500 fois plus d'énergie que celle nécessaire à l'échauffement d'une même quantité d'eau de un degré.

La diminution de la consommation de carburant est très significative, puisque comprise entre 25 et 50%. Ceci représenterait un potentiel de réduction d'environ 0,7 million de tonnes de pétrole, si l'ensemble des enrobés fabriqués en France étaient produits selon ce nouveau procédé (il ne semble pas opportun de vouloir généraliser à tout prix ce mode de fabrication, la diversité restant un moyen d'optimiser les productions et les coûts). Les constats réalisés sur chantier attestent que les enrobés tièdes réduisent les températures de fabrication, dans une gamme de 25 à 60°C, selon la nature des procédés. Ainsi tous ces procédés, dit à basse consommation d'énergie, contribuent à réduire la facture énergétique et par voie de conséquence à diminuer très sensiblement les émissions gazeuses ou solides.

Les informations communiquées par les entreprises sur les premiers résultats concernant les émissions gazeuses résultent de mesures réalisées par des bureaux d'étude spécialisés en France (INERIS, VERITAS) et à l'étranger (Belgique et Allemagne). Ces mesures de rejets dans l'atmosphère montrent :

- des émissions à la sortie de la cheminée de la centrale d'enrobage sont réduites de manière significative,
- des émissions des composés organiques volatiles (COV) sont en baisse sensible,
- des émissions de GES comme le CO₂, NO₂ et SO₂ sont réduites dans la même proportion que le gain énergétique soit de l'ordre de 25% à 50% selon les procédés.

Des mesures sur le personnel à la mise en œuvre ont également été effectuées. Les taux étant extrêmement faibles, et souvent à la limite de détection des appareils et méthodes utilisées, il est donc bien difficile de conclure à des améliorations. Cependant, on peut confirmer l'absence significative (avec le protocole utilisé) d'émission pour les enrobés à chaud ou tièdes. Les poussières inhalables se situent, selon les mesures des entreprises, à des niveaux très inférieurs aux valeurs moyennes d'exposition des personnels (en France : 5 mg/m³ pour 8 heures d'exposition ; 0,5 kg/m³ recommandation de la conférence intergouvernementale sur l'hygiène aux USA) [17].

Les conditions de travail des personnels sont nettement améliorées, il n'y a plus, ou très peu, de vapeurs d'eau dégagées sur le chantier. La température aux abords du chantier devient acceptable, surtout lorsque les étés sont caniculaires. En cas d'intempéries soudaines, il n'y a plus de vaporisation sur l'enrobé chaud, entraînant des problèmes de visibilité pour l'usager, mais également d'accident grave pour les opérateurs (agents écrasés par les compacteurs du fait des fumées).

Des recherches sont à entreprendre pour mettre au point des appareillages et des protocoles d'essais spécifiques unifiés pour quantifier les émissions (nature et taux) émises par les techniques bitumineuses dans l'environnement, quel qu'en soit le principe de fabrication. Des mesures d'émissions gazeuses et solides, ainsi que des bilans environnementaux doivent être effectués lors des évaluations des procédés tièdes, pour attester des gains effectifs en matière de consommation, d'émission à la centrale (composés toxiques : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques HAP, COV, ...) et à la mise en œuvre. Des études d'analyse de cycle de vie, depuis la production des constituants, incluant aussi ceux introduits en très faible quantité dans le mélange, en passant par la production, application, bilan d'usage et jusqu'à la fin de vie du produit, doivent être réalisées pour conforter l'intérêt de ces enrobés tièdes, comparativement aux enrobés traditionnels à chaud, ou à froid.

6.2. Propriétés mécaniques

Les formulations des enrobés tièdes sont semblables à celles des enrobés à chaud, exception faite des additifs incorporés. Ceux-ci sont introduits soit dans le liant (agent moussant, d'adhésivité ou surfactant), soit dans les matériaux (humidification du sable), soit dans le malaxeur (additifs hygroscopique), à des dosages faibles (quelques 0,3 pour mille à 4% dans le bitume, 1 à 2 % d'eau, ajout à raison de 0,2 à 0,4 % du mélange).

Les performances de laboratoire, des enrobés tièdes, s'avèrent tout à fait comparables aux enrobés bitumineux préparés selon le mode de fabrication conventionnel à chaud. Le tableau 2 présente des exemples de résultats communiqués par les entreprises et issus de quelques réalisations suivies par le RST. On notera qu'il convient d'examiner avec attention le comportement des enrobés tièdes vis à vis de la résistance au désenrobage

(essai Duriez) et de prévoir avec certain type de granulat l'usage d'un agent spécial d'adhésivité.

Sur le plan des comportements mécaniques, les mesures réalisées sur les chantiers expérimentaux conduisent à des résultats généralement assez similaires à ceux obtenus avec les enrobés à chaud traditionnels. Ainsi au jeune âge, ou après un ou deux ans de suivi, on ne semble pas constater de différences significatives.

Les quelques données sur les propriétés mécaniques (module complexe et résistance en fatigue) proviennent d'études d'entreprises (étude de formulation en laboratoire et prélèvements de chantier). Les résultats conduisent à des valeurs conformes aux spécifications imposées pour les enrobés à chaud.

Tableau 2 – exemples de comparaison de performance entre enrobés à chaud traditionnels et enrobés tièdes (fabrication en laboratoire ou sur chantier)

	Sans - avec aspha-min BBSG (labo-chantier)	Sans - avec aspha-min BBSG (chantier Autoroute)	Chaud – tièdes EBT BBSG 2 - 0/10 (labo)	Chaud – tièdes EBE BBSG 2 - 0/10 (labo)
Données	LRPC	Entreprise	Entreprise	LRPC
Liant	35/50	35/50	35/50	35/50
Températures (°C)	155 - 123		160 - 90	150 - 85
% vides (PCG 60g) moyenne (chantier) étendue (chantier)	8,5* 5 - 7,5 4/5 - 5/9	6,5 - 7,3	9 - 7	7,5 - 11,5
Duriez r/R (%)	0,95*		0,94 - 0,84	0,9 - 0,95
Orniérage (%) après 30 000 cycles	4,6*		6,4 - 6,5	6,0 - 6,1
E 15°C – 10Hz (MPa) E 15°C – 0,02S (MPa)		10 400 - 11 300		NC - 8 300
Fatigue Ep 6			105** - 104**	
HSv (mm)		0,98 - 1,03		

* résultats comparables (avec et sans aspha-min)

** valeur estimée à partir de la correction de teneur en vides

Mais qu'en sera-t-il sur le long terme, pour les aspects durabilité (vieillesse) et surtout de comportement à la fatigue ?

Une nouvelle Opération de Recherche 'OPTIMIRR' – OPTImisation des Matériaux routiers économes et Incorporant des Recyclés de la Route [20] - inscrite dans le programme de recherche sur les « matériaux et structures économes en ressources non renouvelables » du contrat quadriennal du LCPC a débuté en 2006 et a pour vocation d'apporter des réponses à ces questions.

Seuls des essais en semi grandeur sur des structures soumises à des charges lourdes pourraient nous donner une réponse, et ce comparativement aux enrobés à chaud classiques. Le manège de fatigue des chaussées du LCPC au centre de Nantes est susceptible d'accueillir ce type d'expérimentation, avant de se lancer à des applications industrielles de très grandes envergures. Ces essais pourraient permettre non seulement d'évaluer les performances à long terme des enrobés tièdes, mais également, le cas échéant, de proposer de nouveaux coefficients de calage à introduire dans les modèles de

calcul de dimensionnement des chaussées et d'appréhender de nouveaux types de comportement ou de dégradations (sensibilité particulière au désenrobage, par exemple).

6.3. Propriétés de surface, conditions d'application et remise au service

Bien qu'appliqués à des températures plus basses, la maniabilité des enrobés ne semble pas pour autant affectée, comme en témoignent les résultats concernant la teneur en vides en place, les qualités de l'uni (caractéristique parfois délicate à satisfaire avec les produits bitumineux à froid), la texture de surface, l'adhérence ou la qualité des joints entre bandes de répandage. Les mesures réalisées sur les chantiers expérimentaux conduisent à des résultats comparables à ceux obtenus avec les enrobés à chaud traditionnels. Ainsi au jeune âge, ou après un ou deux ans de suivi, on ne semble pas constater de différences significatives.

Comme indiqué ci avant, on estime même que pour certains procédés le temps d'application pouvait être doublé, par rapport à celui des enrobés traditionnels à chaud. Ceci permettrait soit d'augmenter les distances de transport : chantier-centrale, soit d'étendre la période d'application des enrobés par des températures plus fraîches. Cette dernière caractéristique a également été validée au Canada, où l'on a réussi à appliquer des enrobés à chaud produits à moins de 100°C (selon un processus mis au point par une société canadienne), par des températures de 5°C, avec une bonne maniabilité et une densification satisfaisante.

L'emploi des enrobés tièdes conduit à des températures de fin de compactage également plus basses que les enrobés à chaud traditionnels (55 à 80°C selon les procédés). Cela constitue un avantage important car il est possible de remettre en service plus rapidement la chaussée, dès la fin de la mise en œuvre, sans risque de déformations permanentes.

6.4. Matériels de fabrication : les conséquences

Suivant les procédés, les modifications apportées sur les centrales d'enrobage peuvent concerner :

- le mode d'introduction de l'additif selon la nature (granulé, fines ou liquide) par l'anneau de recyclage, le circuit du filler de récupération, des sacs thermo-fusibles dans le malaxeur, un doseur en ligne, un doseur pondéral, ajout dans la citerne de liant,...
- l'introduction du sable à température ambiante et l'ajustement de son humidité (sonde de teneur en eau, doseur en eau et dispositif d'arrosage), par un circuit spécifique ou par l'anneau de recyclage,
- la fabrication de la mousse,
- le double enrobage (circuit séparé du sable humide)...;

Dans la pratique les modifications sont dans l'ensemble assez mineures. Les développements ont été effectués par les entreprises de travaux routiers, elles mêmes, aussi les solutions apportées restent du domaine des essais (la faisabilité industrielle étant déjà démontrée). Bien entendu, il conviendra d'en évaluer l'incidence économique sur les installations actuelles.

Dans l'avenir, les fabricants de matériels mettront au point des systèmes industriels plus performants pour améliorer encore les rendements énergétiques (nouveau brûleurs mieux adaptés à des températures de fonctionnement plus basses), les séquences de fabrication avec ou sans additifs (double enrobage, double liant,...) et la récupération et l'évacuation des vapeurs d'eau, évitant toute condensation et corrosion. Les fabricants travaillent sur

ces nouvelles centrales de fabrication pour la production d'enrobés à basse consommation d'énergie [21].

7. CONCLUSION

Les travaux de recherche des entreprises routières et pétrolières ont conduit à la mise au point de procédés entrant dans le champ opérationnel permettant de produire des enrobés tièdes.

Ainsi, il est donc possible de :

- réduire la température des enrobés,
- conserver leurs caractéristiques mécaniques et leurs propriétés de surface,
- diminuer les émissions dans l'atmosphère,
- raccourcir le délai de remise à la circulation,
- ... dans des conditions économiques acceptables.

La faisabilité de ces procédés a été démontrée pour l'élaboration d'enrobés classiques au bitume pur de grade 35/50 pour les assises ou les couches de surface. Certains procédés sont capables de produire des enrobés à base de bitume dur ou de liant modifié par des polymères, et d'incorporer des matériaux recyclés.

Les procédés d'enrobés tièdes s'inscrivent véritablement dans la démarche de développement durable, et des nouvelles valeurs sociétales qui privilégient l'environnement. Les enrobés tièdes répondent aux attentes de préservation des ressources naturelles non renouvelables, d'économies d'énergie, d'un meilleur respect de l'environnement par une réduction des émissions de gaz à effets de serre, de moindre rejet des poussières. Parallèlement, ils conduisent à des objectifs de performances conformes à ceux des enrobés à chaud, à savoir des propriétés mécaniques et de surface toujours plus élevées, plus polyvalentes ou plus ciblées (module élevé, adhérence, couleurs, recyclabilité,...).

Le suivi et l'évaluation technico-économico-environnementale doivent être poursuivis pour se faire un avis suffisamment fiable et indépendant des possibilités offertes par les techniques tièdes ou semi tièdes. Cela permettra de mieux comprendre leur mode de fonctionnement et d'en cerner précisément le domaine d'emploi.

REFERENCES

1. Conférence internationale sur le réchauffement climatique. Paris. Principales conclusions du 4^{ième} rapport scientifique du GIEC publié le 2 février 2007. <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>
2. Plan Climat 2004 <http://www.ecologie.gouv.fr/Discours-pour-la-presenta-tion-du.html>
3. Les enrobés tièdes, une alternative. Route Actualité. N° 136. juillet-août 2004.
4. Innovation et recherche: la FNTF se mobilise. Route Actualité. N° 144. juin 2005.
5. M.F. Ossola. Les basses calories font recette. Revue Générale des Routes et Aéroports. N°845. janvier 2006.
6. NF EN 13 108-1 Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux - Les enrobés.
7. NF EN 13 108-2 Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux - Les enrobés très minces.
8. NCAT 05-06 - Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn University. juin 2005.
9. P.A. Landa, T. Kneepkens, J .Th. v.d. Zwan. Low temperature asphalt, a production process with the possibility to produce and pave hot mix asphalt at temperatures below 100°C or 212°F. Eurobitume – Eurasphalt. Vienne 2004.
10. Les applications d'enrobés tièdes se multiplient. Route Actualité. N° 145. juillet-août 2005.
11. NCAT 05-04 - Evaluation of Asphalt-min zeolithe for use in warm mix asphalt. National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn University. juin 2005.

12. F. Olard, C. Le Noan, P. Huron. Les enrobés à basse température: EBT. Une nouvelle génération d'enrobés dans la gamme des produits routiers Appia. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°846. février 2006.
13. F. Olard, C. Le Noan, A. Romier. Les enrobés basse énergie (EBE) et basse température (EBT). Bilan des chantiers réalisés en 2005 et 2006. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°854. décembre 2006 - janvier 2007.
14. A. Romier, M. Audéon, J. David, Y. Martineau. L'enrobage à basse énergie (EBE), aux performances des enrobés à chaud. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°831. septembre 2004.
15. Y. Martineau, J. David. Nouveau procédé d'enrobage, le procédé EBE permet de produire des mélanges performants, équivalents aux enrobés à chaud, à moins de 100°C. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°844. novembre 2005.
16. Enrobés environnementaux. Une nouvelle conception de Colas bitumineux à chaud ; Les enrobés 3^E : parcours citoyen pour économiser de l'énergie et réduire les gaz à effet de serre. Travaux N°821. juillet 2005.
17. X. Carbonneau, J.P. Henrat, F. Letaudin. Enrobés 3 E de Colas : une réponse sûre à la problématique des enrobés dits tièdes. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°849. juin 2006.
18. M. Lecomte, L. Achimastos, C. Leroux. Enrobés tièdes Shell Bitumes et développement durable. Revue Générale des Routes et Aérodrômes. N°844. novembre 2005.
19. Salon des maires 2005. Les lauréats des prix de l'innovation. Le moniteur. 25 novembre 2005. Ville et transports. 7 décembre 2005.
20. OPTimisation des Matériaux routiers économes et Incorporant des Recyclés de la Route http://www.lcpc.fr/fr/recherches/recherches_encours/index_1.dml
21. Fayat on the roads – HMA Production – Special Issue - Road Building Equipment Magazine. N° 11. décembre 2006.