

TECHNIQUE INNOVANTE D'ENROBAGE À BASSE ENERGIE POUR MINIMISER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA CENTRALE D'ENROBAGE AU CHANTIER

F. OLARD

Direction de la Recherche & du Développement, EIFFAGE Travaux Publics, France

folard@travauxpublics.eiffage.fr

C. LE NOAN

Direction Matériel, EIFFAGE Travaux Publics, France

clenoan@travauxpublics.eiffage.fr

A. ROMIER

Président, LEA-CO, France

alain@fairco.fr

RÉSUMÉ

Différentes techniques brevetées d'enrobage à basse énergie (acronyme: LEA[®]) à 90°C ont récemment été développées par la société LEA-CO (low energy asphalt company) comme alternatives à l'enrobage à chaud traditionnel à 150-190°C. Ces nouvelles techniques d'enrobage LEA[®] à 90°C permettent de réduire efficacement les impacts environnementaux pendant la fabrication, le transport et la mise en œuvre sur chantier. Sur poste d'enrobage, on obtient un moindre vieillissement du liant, une économie d'énergie d'origine fossile (gaz naturel ou fioul lourd) de 30 à 50%, ainsi qu'une diminution des émissions de gaz à effet de serre du même ordre. Sur chantier, les fumées et odeurs diminuent fortement et l'ouverture au trafic est quasi immédiate après compactage. Cet article propose des exemples pratiques et des études de cas traitant de la façon dont les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les producteurs d'enrobés bitumineux et même les fabricants de matériels d'enrobage peuvent mener à bien des politiques de développement durable en phase de construction ou d'entretien des chaussées en préconisant cette nouvelle génération d'enrobés. Concernant les performances mécaniques et la durabilité du matériau, divers exemples d'études de formulation d'enrobés en laboratoire, validés également *in-situ*, sont enfin présentés dans les détails.

1. INTRODUCTION

Les enrobes à chaud sont communément fabriqués à des températures supérieures à 150°C sur des postes d'enrobage continus (production continue) ou discontinus (production par gâchées successives). Les granulats sont chauffés dans un tambour rotatif à des niveaux de températures extrêmement élevés afin de chasser toute l'eau adsorbée ou absorbée dans les pores. Le séchage total est exigé de façon à assurer un enrobage parfait du granulat et à réduire au maximum la sensibilité à l'eau du mélange final.

Pour des raisons économiques (prix croissant du pétrole et du gaz) et environnementales, l'industrie routière a développé de nouvelles techniques d'enrobage économes en énergie. L'industrie a tout d'abord proposé les mélanges à froid [1-2], fabriqués et mis en œuvre à température ambiante, dont la durabilité est difficile à prévoir et souvent liée à une variabilité élevée des mécanismes de cure et de montée en cohésion. C'est une des raisons pour lesquelles la production annuelle européenne d'enrobés à froid en 2005 était de 6 millions de tonnes tandis que celle des enrobés à chaud s'élevait à 321 millions [3].

De nouveaux enrobés dits « tièdes » sont récemment apparus, permettant une réduction substantielle de la température de production (20 à 40°C) et présentant des propriétés

mécaniques comparables à celles des enrobés à chaud. Ces enrobés tièdes sont souvent basés sur des liants ou des combinaisons de liants ou encore des additifs modifiant les propriétés rhéologiques du bitume pendant la fabrication et l'application du mélange. A la mise en œuvre, la température du mélange est nettement supérieure à 100°C afin d'obtenir les niveaux de compacité requis. Bon nombre d'articles américains et européens ont récemment décrit les techniques « tièdes » disponibles et leur utilisation [4-11].

C'est dans ce contexte que différents procédés d'enrobés dits « semi-tièdes » sont également apparus, le liant étant une émulsion [12-15] ou une mousse de bitume [16-20] ou plus simplement un bitume anhydre [21-31]. L'originalité de ces nouvelles techniques tient aux températures de fabrication et d'application inférieures à 100°C. La température minimale d'application est proche de 70°C selon la nature des matériaux considérés et les conditions de mise en œuvre. Les enrobés semi-tièdes, tout comme les enrobés tièdes présentent des propriétés mécaniques comparables à celles des enrobés à chaud.

2. BACKGROUND

2.1. Terminologie

La Figure 1 illustre les quatre familles d'enrobés classées en fonction de leur température d'enrobage, de l'énergie consommée et des émissions en CO₂ correspondantes [27,32] :

- les enrobés à froid, fabriqués à température ambiante à partir d'émulsion ou de mousse de bitume,
- les enrobés semi-tièdes, fabriqués en deçà du point d'ébullition de l'eau (<100°C),
- les enrobés tièdes, fabriqués à 120-140°C selon le procédé de fabrication retenu,
- les enrobés à chaud traditionnels, généralement fabriqués entre 150 et 180°C.

2.2. Chiffres clés

Le calcul théorique de la quantité d'énergie calorifique consommée en centrale se fonde principalement sur les caractéristiques fondamentales que sont la chaleur spécifique du granulat $c_{\text{granulat}}=850\text{J/kg/}^\circ\text{C}$, de l'eau $c_{\text{eau}}=4.2\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$, la chaleur latente d'évaporation de l'eau $L_{\text{évaporation}}=2250\text{kJ/kg}$, la chaleur spécifique de la vapeur $c_{\text{vapeur}}=1.85\text{kJ/kg/}^\circ\text{C}$. Par conséquent, l'énergie calorifique consommée dépend directement de la température de fabrication et de l'humidité initiale des granulats. De plus, il convient de noter que:

- L'énergie requise pour le chauffage de granulats secs est 5 fois plus faible que celle utilisée pour élever à la même température une masse équivalente d'eau,
- La chaleur latente d'évaporation de l'eau équivaut à 5 fois l'énergie requise pour élever la même masse d'eau de 0 à 100°C. Excéder le seuil des 100°C augmente considérablement les dépenses énergétiques.

2.3. Enjeux énergétiques et environnementaux

Les enrobés tièdes et semi-tièdes permettent des économies d'énergie en centrale dans des proportions différentes: les enrobés tièdes à 130°C environ au lieu de 160°C, avec un surcoût de production dû à l'utilisation d'additifs ou à une fabrication plus complexe et/ou à une cadence légèrement inférieure, permettent une réduction du chauffage d'environ 15%.

Les enrobés semi-tièdes (<100°C) conduisent à une économie d'énergie allant jusqu'à 50% (dépendant du process, du poste d'enrobage et des matériaux utilisés). Pour un enrobé semi-tiède à l'émulsion ou à la mousse de bitume, l'économie d'énergie globale est moindre. En effet, l'émulsion et la mousse contiennent respectivement environ 35% et 5% d'eau, ce qui implique une température de chauffage plus élevée du granulat. Le choix de

du bitume anhydre dans le procédé LEA est simple et économique. Le bilan énergétique est confirmé sur poste après production par le suivi des relevés de compteur gaz ou fioul.

La température d'enrobage inférieure signifie, en particulier, que les émissions de gaz à effet de serre sont également réduites. Comme la réduction d'émissions en CO₂ est d'environ 9 kgCO₂/tonne de par l'utilisation du procédé LEA, en Europe par exemple, les émissions de CO₂ pourraient diminuer de presque 3 millions de tonnes/an, aux USA les émissions pourraient diminuer de près de 5 millions de tonnes/an. Les émissions de composés organiques volatils, quant à eux, proviennent des vapeurs de bitume. Parmi ces derniers, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) présentent en petite quantité ont un impact sur la santé. Une réduction de 13°C de la température de fabrication du mélange engendre une réduction des émissions de HAP de moitié. La réduction de plus de 50% de la température réduit donc considérablement les risques sanitaires impliqués.

Une évaluation du potentiel d'émission en laboratoire pendant la fabrication d'enrobés à chaud ou selon le procédé LEA a récemment été effectuée au LCPC de Nantes: un malaxeur de laboratoire a été équipé d'une cheminée et d'un analyseur en continu des composés organiques volatils totaux (COT) (pour plus de détails sur ce nouveau protocole expérimental, le lecteur peut se rapporter à la référence suivante [31]). La Figure 2 illustre la réduction de COT obtenue pour un enrobé BBSG.

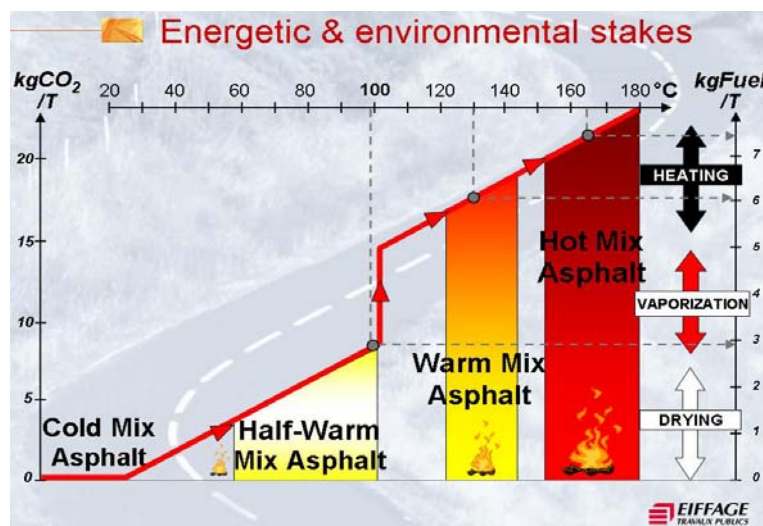


Figure 1. Consommation de carburant d'origine fossile (exemple du fioul) et émission en CO₂ en fonction de la température de chauffage d'une tonne de granulats humides.

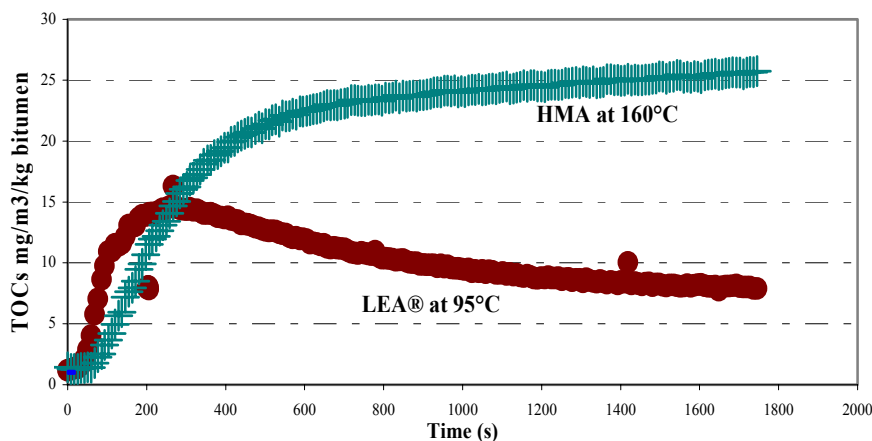


Figure 2. Réduction des émissions en composés organiques volatils totaux (COT) lors d'une fabrication en laboratoire d'un enrobé LEA® du type BBSG (LCPC Nantes).

2.4. Revue des différents procédés existants d'enrobés tièdes et semi-tièdes

Ces procédés innovants d'enrobage à basse énergie et basse température reposent au moins sur l'un des quatre principes suivants:

- Modification de la séquence d'enrobage (sans changer les éléments du mélange)
- Addition de substances qui abaissent la viscosité du bitume
- Introduction d'eau provoquant un moussage in-situ du bitume
- Utilisation d'un liant végétal de faible viscosité

2.4.1. *Modification de la séquence d'enrobage*

Seules deux techniques, à notre connaissance, consistent à modifier la séquence d'enrobage des granulats sans même utiliser un additif quelconque ou encore de l'eau:

- Procédé KGO: seuls les gravillons chauds sont d'abord enrobés avec la totalité du bitume. Le rapport bitume-granulats élevé permet de diminuer la température d'enrobage de 10 à 20°C. Le sable chaud est alors introduit dans le mélange plus facilement et de façon plus homogène selon les auteurs.
- Procédé de double enrobage avec deux bitumes: l'enrobage se fait en deux temps, tout d'abord à l'aide d'un bitume très mou (Pénétrabilité de 160 à 400) de faible viscosité –qui permet d'abaisser sensiblement la température d'enrobage– puis d'un bitume plus dur (Pénétrabilité de 35 à 100).

La faisabilité de ces deux techniques a été démontrée. Cependant, des modifications en centrales doivent être réalisées et la durée de transport de ces mélanges bitumineux doit être sensiblement réduite puisque le compactage doit être réalisé à la même température que l'enrobé à chaud conventionnel (pas d'additif thermoplastique, ni d'eau résiduelle, seule diffère la séquence d'enrobage en centrale).

2.4.2. *Additifs organiques diminuant la viscosité du liant*

Parmi ces additifs, citons les cires principalement, solides à température ambiante mais se ramollissant à partir de 70 à 140°C selon leur nature, ce qui les rend parfaitement dispersibles et solubles dans le bitume chaud, pur ou modifié. Une forte diminution de la viscosité du bitume est obtenue en ajoutant 2 à 4% de cires par rapport au bitume. Les liants ainsi modifiés par adjonction de cire sont stables au stockage. Plus encore, l'effet est permanent et ce jusqu'à la phase de recyclage et de réutilisation du matériau. Lors du refroidissement à la mise en œuvre, la cire se solidifie sous la forme de particules microscopiques, uniformément réparties. Les cires peuvent être introduites directement au malaxeur du poste sous forme solide ou bien pré-mélangées au bitume après passage en usine. Cette dernière possibilité, plus coûteuse, est néanmoins à privilégier pour assurer un mélange homogène et conserver la cadence de production du poste.

Trois classes de cires sont couramment utilisées:

- Cires de Montan (lignite) consistant principalement en des cires d'ester d'acide gras fossile. Cette cire se ramollit à 70°C environ et peut donc engendrer des défauts de résistance à l'orniérage aux températures de service. On la mélange fréquemment à d'autres familles de cires à plus haut point de fusion, comme les cires amides.
- Cires amides synthétiques dont le point de fusion est proche de 140°C.
- Cires sur la base de la synthèse Fischer-Tropsch, constituée d'hydrocarbures linéaires saturés, dont le point de fusion est proche de 115°C. Lorsque la cire est mélangée au bitume, la fusion est proche de 100°C. Par voie de conséquence, l'enrobé doit être appliqué à une température supérieure à 100°C, c'est-à-dire rapidement après la fabrication. Plusieurs millions de tonnes d'enrobés tièdes ont été modifiées avec ce type de cire Fischer-Tropsch durant les dix dernières années.

2.4.3. Technologies basées sur l'eau et le moussage du bitume

Quelques procédés d'enrobés tièdes et semi-tièdes sont basés sur l'introduction d'eau et le moussage du bitume lors de la fabrication. La génération de vapeur d'eau augmente le volume du liant et diminue sa viscosité apparente.

Deux procédés tièdes ($>100^{\circ}\text{C}$) basés sur l'utilisation d'eau sont actuellement utilisés:

- Le procédé WAM (Warm Asphalt Mix)-Foam repose sur un double enrobage nécessitant une modification du poste d'enrobage [4]. On utilise d'abord un bitume mou (pénétrabilité de 160 à 400 1/10mm) chauffé à $110-120^{\circ}\text{C}$, puis une mousse de bitume plus dur (pénétrabilité de 35 à 100 1/10mm). Les granulats secs sont enrobés de bitume mou avant que l'eau ne soit introduite via la mousse; ceci est censé préserver une bonne tenue à l'eau du mélange. Les chantiers tests sont principalement situés en Norvège où le procédé a initialement été développé.
- Utilisation de zéolite en substitution d'une partie du filler d'apport. La zéolite est ajoutée en centrale à l'aide d'un silo additionnel de stockage et d'un système d'alimentation. Ce silicate cristallisé sous forme de poudre blanche très fine contient 21% d'eau dans de petits pores qui est libérée au sein du mélange tiède pendant un délai de une à deux heures. Cette vapeur d'eau provoque un moussage in-situ du bitume. Cet additif est utilisé en Europe et aux Etats-Unis [9].

Trois types de procédés semi-tièdes ($<100^{\circ}\text{C}$) basés sur l'utilisation d'eau sont utilisés:

- Utilisation d'émulsion de bitume moussant au contact des granulats chauds. L'émulsion concentrée à 69% bitume est introduite à 80°C dans le malaxeur. L'eau de l'émulsion est partiellement libérée sous forme de vapeur au contact des granulats chauds ($>100^{\circ}\text{C}$), faisant ainsi chuter la température du mélange. Cependant, le chauffage et le séchage des granulats au-dessus de 100°C limitent les économies d'énergie (chaleur latente d'évaporation de l'eau très énergivore). Les premiers essais sont situés aux USA où le process a été développé [12].
- Utilisation de mousse de bitume mélangée aux granulats tièdes ou semi-tièdes. Malgré l'économie d'énergie de 20 à 40%, la qualité du mélange relatée dans la littérature semble moins bonne que celle des enrobés à chaud traditionnels [19].
- Le procédé LEA (Low Energy Asphalt) est fondé sur un séchage partiel des granulats de façon à tirer parti de leur humidité naturelle résiduelle lors de l'étape d'enrobage (de 70 à 110°C selon les variantes considérées). De par cette siccité partielle, l'eau résiduelle en périphérie des granulats fait mousser naturellement le bitume, créant ainsi spontanément l'auto-expansion du bitume favorisée par l'emploi d'additifs et engendrant par là même une augmentation subite de la surface spécifique du liant effectif et la diminution de la viscosité apparente. Un apport d'eau complémentaire en centrale permet éventuellement de contrôler la moussabilité du liant, la teneur en eau résiduelle du mélange (de l'ordre de 0,1 à 0,5%) et par là même la compactibilité du mélange [21-29]. Les économies d'énergie et d'émissions en gaz à effet de serre (GES) sont d'environ 30 à 50%. De plus amples détails sont donnés aux paragraphes suivants.

2.4.4. Liants végétaux à basse viscosité

Deux des principales entreprises routières françaises ont déjà développé de tels liants végétaux permettant une fabrication et une mise en œuvre des enrobés à des températures proches de 130°C . Très peu de chantiers expérimentaux ont été réalisés jusqu'à maintenant.

3. LEA: UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'ENROBÉS

Comme l'illustre la Figure 3, l'originalité des enrobés LEA repose sur la capacité du bitume chaud à mousser ou s'émulsionner à la surface des granulats tièdes et humides –juste en deçà du point d'évaporation de l'eau (100°C à la pression atmosphérique)– permettant ainsi un enrobage à plus basse température. L'expansion spontanée du volume de bitume mène à un film de liant plus épais autour du granulat et donc à une plus faible viscosité i.e. une meilleure maniabilité du mélange. Selon les études menées en laboratoire, des additifs peuvent être employés pour améliorer la moussabilité ou l'adhésivité du bitume si besoin en est. Les principales variantes du procédé breveté LEA (avec ou sans pré-enrobage) sont représentées Figure 4. En fonction de la formule granulaire et de la configuration du poste, une des variantes suivantes est souvent préférable en termes d'économies d'énergie ou de facilité de fabrication:

- L'étape de séchage peut affecter seulement une 1^{ère} partie des granulats, qui est ensuite enrobée avec la totalité du bitume. La partie froide et humide restante est alors ajoutée. Tous les éléments sont alors mélangés, ou
- L'étape de séchage peut affecter uniquement une 1^{ère} partie des granulats, qui est alors mélangée, avant l'étape d'enrobage, à la partie froide et humide restante, ou
- L'étape de séchage peut affecter l'ensemble des granulats tout en laissant subsister une fraction de l'humidité initiale. L'enrobage avec le bitume chaud a enfin lieu.

Un ajout d'eau est possible pour corriger l'humidité globale avant et/ou après l'introduction du bitume dans le malaxeur. Cet ajout d'eau et les additifs multifonctionnels spécifiques pouvant également être utilisés si besoin est, permettent:

- Une optimisation de la moussabilité du liant (Figure 3), et
- Une correction de la maniabilité du mélange à 90°C de par la condensation d'eau résiduelle en excès (<0.5%), sous forme de gouttelettes microscopiques dispersées dans la matrice bitume.

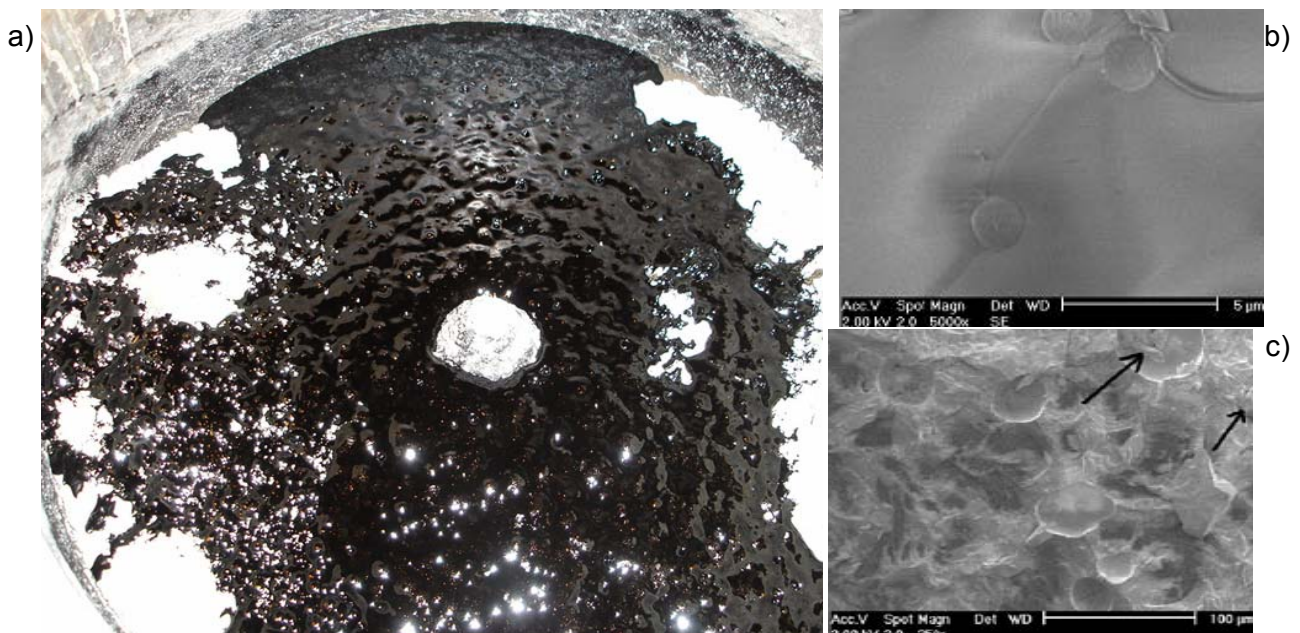


Figure 3. a) Auto-expansion (moussage) du liant lors d'une fabrication LEA[®] au centre de recherche d'Eiffage Travaux Publics, b) & c) Vues au microscope de l'état de dispersion de l'eau (liquide ou vapeur) au sein du bitume [26]. Les cratères correspondent à l'eau déjà évaporée ou aux fines gouttelettes dont le diamètre est compris entre 2 et 50µm.

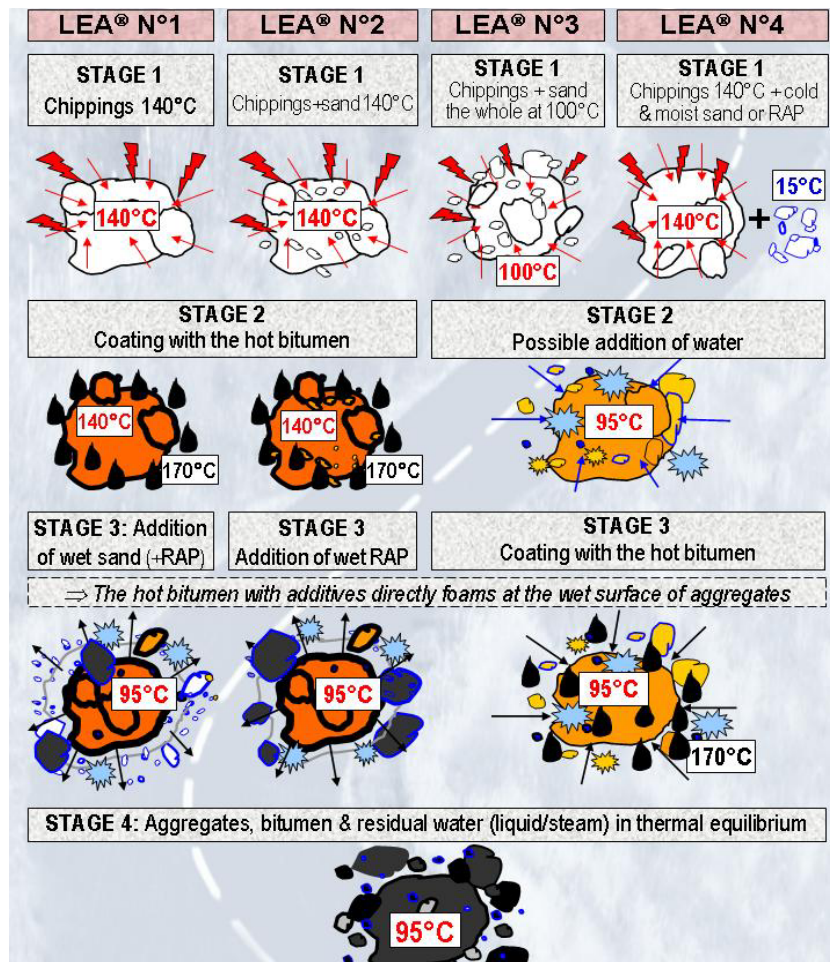


Figure 4. Quatre principales séquences d'enrobage LEA® brevetées, actuellement utilisées sur de nombreux postes continus ou discontinus.

4. REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EN CENTRALES

4.1. Principes de fabrication LEA en centrale continue ou discontinue

Toute centrale d'enrobage fixe ou mobile peut fabriquer des enrobés semi-tièdes LEA. Quelques adaptations de la centrale sont néanmoins nécessaires: changement de la séquence d'enrobage, équipement d'une rampe à eau et d'un système de dosage d'additif et l'automatisme est en outre modifié. La formation de l'équipe du poste est ainsi nécessaire pour appréhender ce nouveau savoir-faire. Jusqu'ici, 25 postes ont été adaptés en Europe. Le stockage en centrale est naturellement possible.



Figure 5. Aucune émission de fumée pendant la décharge du mélange dans les camions.

Par simplicité, seuls deux exemples pratiques sont donnés ci-après: fabrications LEA n°1 et n°4 sur poste discontinu et continu (séchage contre-courant) respectivement.

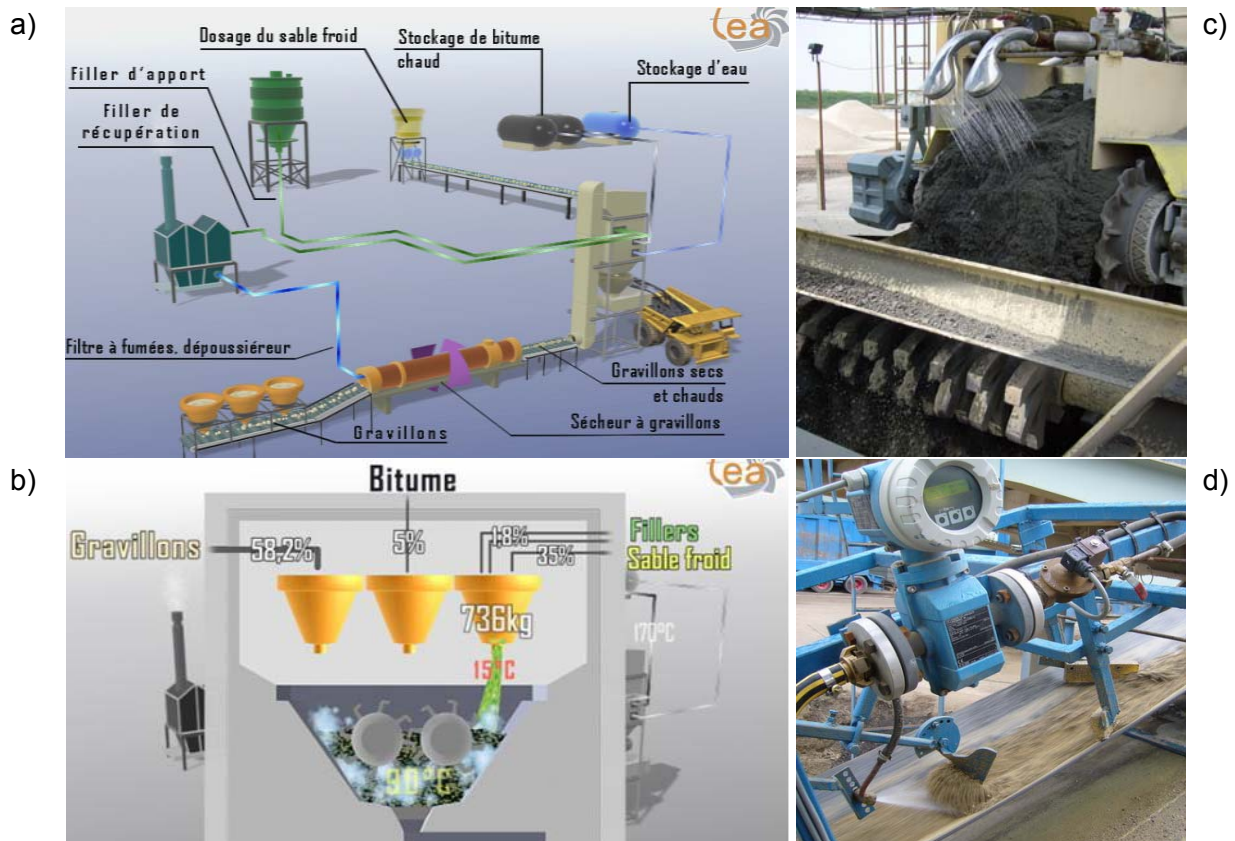


Figure 6. a) Vue générale du process LEA® n°1 sur poste discontinu avec introduction à froid de sable directement au malaxeur, b) Malaxeur typique en mode discontinu, c) & d) Systèmes d'ajout d'eau pour le contrôle d'humidité initiale des granulats introduits à froid.

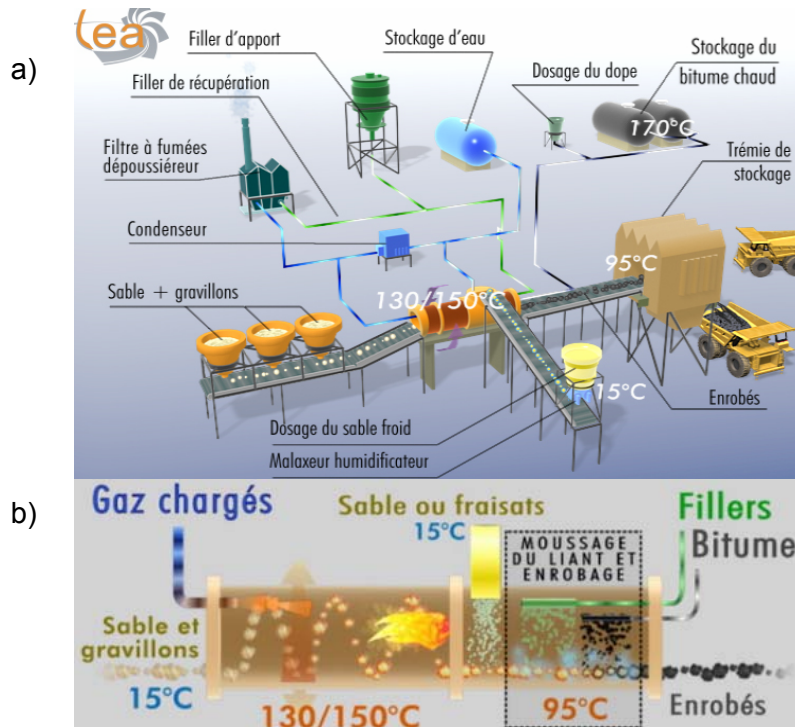


Figure 7. a) Procédé LEA® n°4 sur poste continu avec introduction à froid de sable ou de recyclés par l'anneau de recyclage, b) Tambour Sécheur Enrobeur Contre-Courant.

4.2. Comparaison entre les énergies calorifiques des enrobés à chaud et semi-tiède

En raison du séchage partiel et de l'humidité résiduelle correspondante, la consommation d'énergie en centrale peut être divisée par deux (cf. Figure 1). Ce paragraphe vise à évaluer et démontrer l'économie d'énergie possible. Seule l'énergie nécessaire au chauffage des granulats est prise en considération dans ce qui suit.

Considérons par exemple l'application des procédés LEA n°1 ou n°4 à une formule d'enrobé contenant 35% de sable 0/2. Comme l'illustre la Figure 6a, dans le cas du procédé LEA n°1 sur poste discontinu, le sable froid et humide est introduit directement au malaxeur. Comme illustré Figure 7a, dans le cas du procédé LEA n°4 sur poste continu, le sable froid et humide est introduit par l'anneau. A noter que la production peut être éventuellement optimisée en faisant varier la teneur en sable ainsi introduite.

4.2.1. Hypothèses

- Formule granulaire contenant 65% de gravillons 2/D ("D" est la taille de plus gros gravillons) et 35% de sable 0/2
- Teneur en eau moyenne (humidité naturelle) des granulats: 4%
- Chauffage de la totalité des granulats à 170°C dans le cas de l'enrobé à chaud et chauffage d'une partie des granulats à 140°C dans le cas de l'enrobé LEA
- Température ambiante: 10°C
- Chaleur spécifique du granulat $c_{\text{granulat}}=850 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$, de l'eau $c_{\text{eau}}=4\ 200 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$
- Chaleur latente d'évaporation de l'eau $L_{\text{évaporation}}=2\ 250\ 000 \text{ J/kg}$
- Chaleur spécifique de la vapeur $c_{\text{vapeur}}=1\ 850 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$

4.2.2. Bilan thermique de l'enrobé chaud (température de fabrication=170°C)

Besoin énergétique pour 1000kg de granulats secs chauffés de 10°C à 170°C:

- Chauffage du granulat = $c_{\text{granulat}} \times 1000\text{kg} \times (170^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 136\ 000 \text{ kJ}$
- Chauffage de l'eau = $c_{\text{eau}} \times (1000/960-1)1000 \times (100 - 10) = 15\ 750 \text{ kJ}$
- Evaporation (la conversion de l'eau en vapeur nécessite un fort besoin énergétique: la chaleur latente d'évaporation) = $L_{\text{évaporation}} \times (1000/960-1)1000 = 93\ 750 \text{ kJ}$
- Chauffage de la vapeur d'eau = $c_{\text{vapeur}} \times (1000/960-1)1000 \times (170 - 100) = 5\ 396 \text{ kJ}$

Total de la dépense énergétique $\approx 251 \text{ MJ}$ par tonne d'enrobé à chaud.

4.2.3. Bilan thermique de l'enrobé LEA (température de fabrication=90°C selon les procédés LEA n°1 or n°4)

Le sable (35% des granulats) n'est ni séché ni chauffé, alors que les gravillons (65% des granulats) sont séchés et chauffés à 140°C.

Besoin énergétique pour 1000kg de granulats secs chauffés de 10°C à 140°C:

- Chauffage du granulat = $c_{\text{granulat}} \times 1000\text{kg} \times (140^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 110\ 500 \text{ kJ}$
- Chauffage de l'eau = $c_{\text{eau}} \times (1000/960-1)1000 \times (100 - 10) = 15\ 750 \text{ kJ}$
- Evaporation de l'eau = $L_{\text{évaporation}} \times (1000/960-1)1000 = 93\ 750 \text{ kJ}$
- Chauffage de la vapeur d'eau = $c_{\text{vapeur}} \times (1000/960-1)1000 \times (140 - 100) = 3\ 083 \text{ kJ}$

Sous-Total de la dépense énergétique $\approx 223 \text{ MJ}$.

Total = $65\% \times 223 \approx 145 \text{ MJ}$ par tonne selon le process LEA[®], ce qui correspond à une économie d'énergie théorique de 42% en centrale. Le suivi de la consommation en centrale confirme cet ordre de grandeur de 30 à 50% d'économies d'énergie dues au procédé proposé d'enrobage à basse température. La chute d'émission en CO₂ qui en résulte est de même ampleur.

5. REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SUR CHANTIERS ET AMÉLIORATION DES CONDITIONS DE TRAVAIL

La température d'application est quasiment divisée par deux, facilitant les conditions de travail des compagnons et réduisant les nuisances aux riverains: absence de sensation de forte chaleur, diminution des émissions et odeurs (Fig. 8). A noter qu'une pluie subite sur l'enrobé semi-tiède cause bien moins d'évaporation d'eau et de brouillard, ce qui constitue un facteur de sécurité notable. En outre, l'humidité résiduelle d'environ 0.2 à 0.5% dans le mélange final est non seulement favorable au compactage –sans effet sur la durabilité (cf. évaluation des performances mécaniques à la section 7)–, mais participe également au nettoyage des équipements de par la présence de fines gouttelettes d'eau condensées à la surface des équipements (tambour sécheur enrobeur, finisseur, camion, pelle, etc.). Cela facilite le nettoyage et permet de réduire l'utilisation des solvants.

6. CHANTIERS DE REFERENCE 2005-2007

Dès 2005, une vingtaine d'essais de faisabilité a été effectuée sur plusieurs centrales du groupe EIFFAGE Travaux Publics principalement. Ces démonstrations grandeur réelle ont permis de valider les choix techniques, la fabrication et les méthodes de contrôle avant de poursuivre par de nombreux autres chantiers LEA. Jusqu'ici, près de 60000 tonnes d'enrobés LEA ont été fabriquées sur 21 centrales françaises, 3 espagnoles et également une américaine dans l'état de New-York, ce qui a permis de vérifier l'adéquation de notre éco-procédé avec les divers types de postes (continus ou discontinus) et différentes natures de granulats et de courbes granulométriques. Le stockage en centrale pendant quelques heures a, par ailleurs, été fréquent.

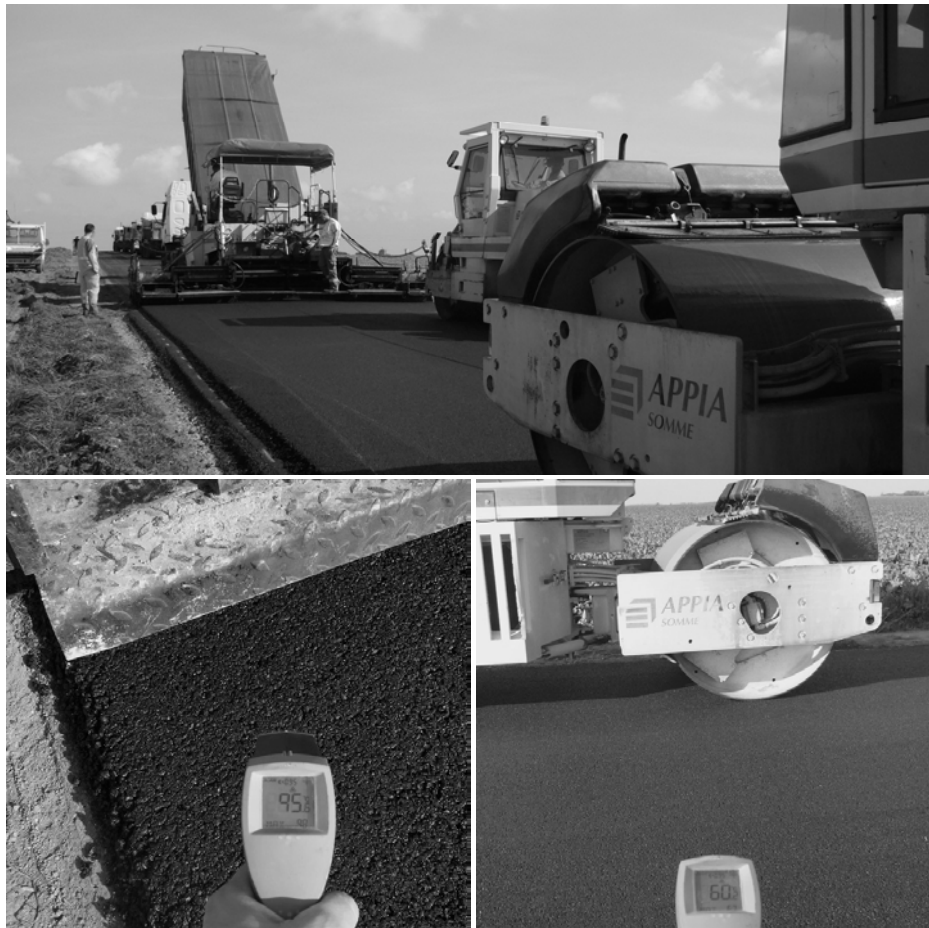


Figure 8. Chantier de 1400 tonnes dont la température d'application va de 60 à 95 °C.



Figure 9. Exemple de chantier LEA[®] de 3100 tonnes (aérodrome vers Béziers, France).

Des formules d'enrobés denses BBSG 0/10 et 0/14, BBME 0/10, GB 0/14 et EME 0/20, ainsi que des formules discontinues BBM 0/10 et BBTM 0/6 ont déjà été utilisées avec bon nombre de matériaux différents. Des bitumes purs 20/30, 35/50 ou 50/70 sont souvent utilisés. La faisabilité du procédé a également été vérifiée avec des 10/20 et 70/100, ainsi qu'avec des liants SBS (liants Biprène[®] du groupe EIFFAGE) avec ou sans réticulation. En général, surtout dans le cas des bitumes durs et des liants polymères, des additifs multifonctionnels sont usités pour améliorer la moussabilité du bitume et l'enrobage. Des enrobés avec agrégats d'enrobés recyclés ont été fabriqués de façon tout à fait classique.

Les conditions climatiques correspondaient aux valeurs saisonnières normales, avec parfois la température de l'air quelques degrés au-dessus de zéro le matin. Comme la différence entre la température ambiante est celle des enrobés LEA est plus petite que pour les enrobés à chaud, le mélange bitumineux refroidit beaucoup moins vite, ce qui permet un transport plus long si besoin en est. Si l'enrobé LEA demeure dans la benne des camions à une température de l'ordre de 70-95°C pendant 5 ou 6 heures entre la production et la mise en œuvre, cela s'avère ne pas être un problème du tout.

Les enrobés LEA s'appliquent au finisseur et se compactent au moyen de compacteurs vibrants traditionnels (Fig. 8 et 9) et parfois de compacteurs à pneus, conformément aux procédures habituelles de mise en œuvre. Les additifs employés permettent d'obtenir sans effort supplémentaire de compactage les niveaux de densité requis. Les enrobés LEA ont un aspect extérieur comparable à celui de leurs homologues fabriqués à chaud. Sur chantier, les contrôles habituels d'épaisseur, de densité et de macrotecture ont été réalisés. Après plusieurs mois (premières réalisations en 2004-05), ces différents sites ont été revisités pour évaluer l'état de la chaussée et/ou pour prélever des carottes in-situ pour évaluation de la densité et du module complexe ou sécant de ces carottes en compression diamétrale (cf. description détaillée de l'essai dans les références [33-35]).

7. EVALUATION DES PERFORMANCES EN LABORATOIRE

7.1. Objectif et description des procédures d'essais

Bon nombre d'études de laboratoire ont été réalisées afin de déterminer les performances mécaniques des enrobés LEA, ces études incluant notamment les essais suivants:

- La maniabilité mesurée grâce au maniabilimètre Nynas [36]. Le résultat d'essai est exprimé en Newtons. Plus il est grand, plus le mélange est difficile à appliquer.
- L'aptitude au compactage, mesurée à la presse à cisaillement giratoire « PCG » (Figure 10a) selon la norme NF P 98 252. Ce test est un très bon indicateur du pourcentage de vides obtenu sur chantier, en fonction de l'épaisseur de la couche. Ce test, réalisé avant les autres essais comme screening, est le plus couramment utilisé en France pour l'optimisation des formules d'enrobés à chaud.
- La tenue à l'eau, mesurée avec l'essai Duriez (NF P 98-251-1) consiste en un essai de compression simple sur deux lots d'éprouvettes cylindriques, dont un lot est conservé dans l'eau durant huit jours. Si le rapport « r/R » des résistances en compression obtenues selon les modes de conditionnement eau/air est supérieur à une certaine valeur, le matériau est jugé acceptable. Ce rapport r/R est l'homologue français de l'ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) sur éprouvettes Marshall.
- La résistance à l'orniérage à 60°C, caractérisée selon la norme NF P 98-253-1. Deux plaques d'enrobés rectangulaires par mélange sont chacune soumises aux passes répétées d'une roue équipée d'un pneu à pression contrôlée et à fréquence constante, engendrant ainsi une déformation permanente (Figure 10b).
- Le module de rigidité et la résistance en fatigue à 10°C-25Hz, selon la norme NF P 98-261-1 (fatigue en déformation contrôlée sur éprouvettes trapézoïdales).

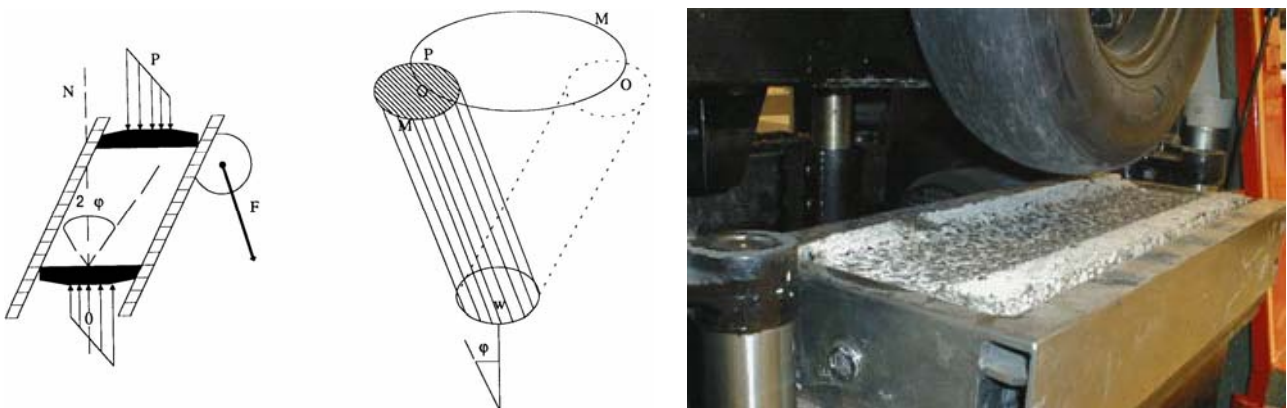


Figure 10. a) Principe de compactage à la presse à cisaillement giratoire, b) Ornièreur français à la fin de la procédure d'essai, l'ornière centrale de la plaque est visible.

7.2. Deux exemples typiques d'études de formulation d'enrobés denses LEA

Deux exemples d'études de laboratoire réalisées sur des formules GB 0/14 & BBSG 0/10 diorite avec bitume pur 35/50 –respectivement employés en couche de fondation ou couche de base et en couche de surface–, sont ici présentées. Les résultats obtenus sur l'enrobé à chaud témoin et sur l'enrobé LEA, respectivement fabriqués à 160°C et 90°C, sont du même ordre et jugés très satisfaisants (cf. Tableaux 1 & 2).

La tenue à l'eau de la formule GB 0/14, mesurée à l'essai Duriez (test sévère s'il en est), semble légèrement plus faible que celle de l'enrobé à chaud de référence, ceci semble dû à une température de fabrication trop basse (87°C); nous recommandons en effet une température minimale de fabrication de 90°C (intervalle idéal: 90-100°C). D'aucuns pensent que l'humidité résiduelle en sortie de malaxeur, aussi minime soit-elle (<0,5%), engendre une susceptibilité accrue à l'eau et par là même une diminution de la durabilité.

Cette assertion est infirmée par les études menées jusqu'ici au Centre d'Etudes et de Recherches (CER) d'EIFFAGE Travaux Publics, ainsi qu'au LCPC Nantes dans le cadre d'un partenariat scientifique. Pour preuve, les seuils normatifs des enrobés à chaud sont toujours respectés. Par précaution cependant, l'étude de formulation des enrobés LEA commence généralement par l'essai Duriez comme screening préliminaire, et ce au lieu de l'essai PCG réalisé généralement en premier lieu pour les enrobés à chaud.

Quant au BBSG 0/10 (Tableau 2), il convient de souligner que l'écart de teneur en vides sur les éprouvettes testées en fatigue explique la faible différence entre les résistances obtenues. La méthode LPC, rappelée dans le « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud » de septembre 2005 a ici été utilisée pour estimer les niveaux de résistance en fatigue à équivalence [37]: la variation de la valeur de ε_6 ($\Delta\varepsilon_6$) en fonction d'une variation de compacité (ΔC), pour une teneur en bitume fixée, peut être approchée par la formule suivante : $\Delta\varepsilon_6 = 3.3*\Delta C$ (formule de prévision LPC initialement développée avec la même formule granulaire). Pour cette formule BBSG 0/10, à 5.4% de vides, l'enrobé à chaud et l'enrobé LEA présentent la même résistance en fatigue (97 μ m/m).

Tableau 1. Etude de formulation d'une GB 0/14 diorite LEA[®] Vs enrobé à chaud témoin.*

Matériau	GB 0/14 La Noubleau, liant 35/50		Spécifications Classe 2 NF P 98-138
	HMA (160 °C)	LEA [®] (87 °C)	
Maniabilimètre Nynas (à température d'application)	79N à 110°C	120N à 75°C	150N correspond à la valeur maximale jugée acceptable
Essai PCG (100 girations)	5.9 %	7.6 %	≤ 11 %
Essai Duriez (Essai de compression directe et de tenue à l'eau)	R = 11.4 MPa r/R = 0.94	R = 9.5 MPa r/R = 0.70	R ≥ 6 MPa r/R ≥ 0.70
Essai d'orniérage (60°C, 10000 cycles)	4.7 %	4 %	≤ 10 %
Essai de fatigue à 10°C-25Hz (Essai de flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales)	Teneur en vides non mesurée E*(10°C-25Hz)=16700MPa $\varepsilon_6=92\mu\text{m/m}$	Eprouvettes à 7.9% de vides E*(10°C-25Hz)=13400MPa $\varepsilon_6=86\mu\text{m/m}$	$\varepsilon_6 \geq 80\mu\text{m/m}$

*Etude réalisée au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) de Nantes.

Tableau 2. Etude de formulation BBSG 0/10 diorite LEA[®] Vs enrobé à chaud témoin.**

Matériau	BBSG 0/10 La Noubleau, liant 35/50		Spécifications Classe 2 NF P 98-130
	HMA (160 °C)	LEA [®] (90 °C)	
Maniabilimètre Nynas (à température d'application)	55N à 110°C	60N à 75°C	150N correspond à la valeur maximale jugée acceptable
Essai PCG (60 girations)	9.1 %	7.1 %	9 % ≥ 4 %
Essai Duriez (Essai de compression directe et de tenue à l'eau)	R = 11.7 MPa r/R = 0.98	R = 10.8 MPa r/R = 0.84	R ≥ 7 MPa r/R ≥ 0.75
Essai d'orniérage (60°C, 30000 cycles)	6.4 %	6.5%	≤ 7.5 %
Essai de fatigue à 10°C-25Hz (Essai de flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales)	Eprouvettes à 3% de vides E*(10°C-25Hz)=15700MPa $\varepsilon_6=105\mu\text{m/m}$ & pente b=-0.19 Calcul LPC à 5.4% de vides $\Delta\varepsilon_6=3.3*\Delta\text{densité} = 3.3*2.4$ $\Rightarrow \varepsilon_6 = 97.08\mu\text{m/m}$	Eprouvettes à 5.4% de vides E*(10°C-25Hz)=14400MPa $\varepsilon_6 = 97\mu\text{m/m}$ & pente b=-0.17	$\varepsilon_6 \geq 100\mu\text{m/m}$ (rarement requis)

** Etude réalisée au centre de recherche d'EIFFAGE Travaux Publics à Lyon.

La faisabilité des enrobés LEA avec divers liants purs et modifiés a en outre été vérifiée en laboratoire et sur chantiers, en utilisant des formules denses ou poreuses. Plus de 70 études de formulation LEA ont été effectuées jusqu'ici, démontrant toutes l'équivalence des performances mécaniques des enrobés LEA et à celles des enrobés à chaud.

7.3. Etude paramétrique

L'influence de l'humidité initiale et de la teneur en agrégats d'enrobés recyclés d'un enrobé semi-tiède LEA a été spécifiquement étudiée de façon à maximiser la tenue à l'eau d'une formule initialement très susceptible à l'humidité. Les résultats de cette étude, en Figure 11, illustrent notamment l'intervalle d'humidité initiale des granulats (de 0,9 à 1,4%) et même le pourcentage de recyclés (25% pour la formule ici considérée) à viser en centrale d'enrobage. Par conséquent, aussi intéressants et innovants puissent paraître les enrobés LEA, l'optimisation de la formule en laboratoire est réellement aussi importante que pour tout enrobé à chaud.

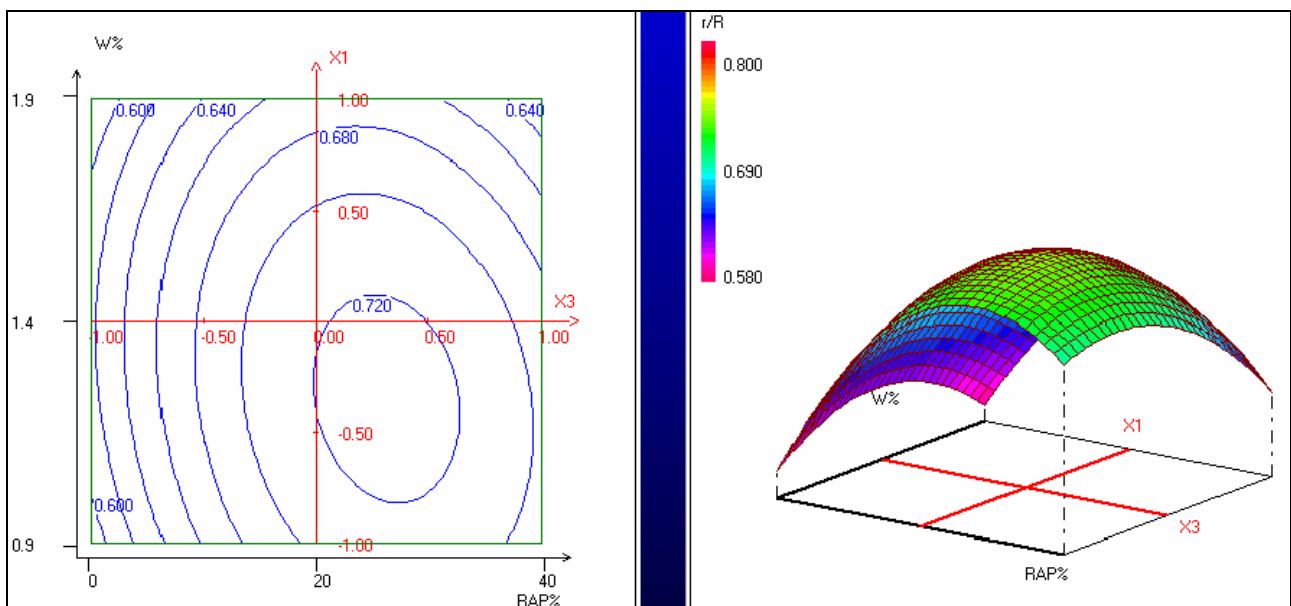


Figure 11. Exemple d'optimisation de la tenue à l'eau (r/R) d'un enrobé LEA selon son humidité initiale et sa teneur en recyclés (centre de recherche EIFFAGE Travaux Publics).

CONCLUSION

Les enrobés LEA® (low energy asphalt) répondent à une démarche d'éco-conception : amélioration de la qualité écologique du produit, i.e. réduction des impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie, en conservant sa qualité d'usage.

Choisir ces enrobés produits et mis en œuvre à des températures inférieures à 100°C, c'est faire un choix aussi bien écologique qu'économique. En effet, le coût énergétique (consommation de combustible d'origine fossile (fuel ou gaz naturel), par là même non renouvelable) et environnemental (émissions de gaz à effet de serre, etc.) des procédés d'enrobage actuellement utilisés sur les centrales d'enrobés peut être réduit de près de moitié en évitant une surchauffe inutile des matériaux et en traitant soigneusement les dépôts d'eau libre et liée aux environs de 100°C. De plus, cette solution s'adapte parfaitement à l'outil industriel existant, se déclinant aussi bien sur les postes continus que discontinus sans adaptation coûteuse du matériel.

Véritable alternative aux enrobés traditionnels à chaud, ces enrobés de nouvelle génération présentent un bilan environnemental très intéressant. De par le principe même

de leur fabrication à 90°C, ils constituent la solution minimisant au mieux les impacts environnementaux (du poste d'enrobage au chantier) parmi les différents procédés tièdes et semi-tièdes existants.

Contrairement aux enrobés à froid, les enrobés LEA[®] conservent des performances mécaniques équivalentes à celles des enrobés à chaud de référence, i.e. conformes à l'état de l'art. La teneur en eau résiduelle des mélanges de l'ordre de 0,2 à 0,5% en deçà des 100°C nous conduit à porter une attention particulière à l'évaluation de la tenue à l'eau en laboratoire (essai Duriez ou ITSr). Cette simple vérification est par ailleurs nécessaire pour tout procédé tiède ou semi-tiède basé sur l'eau et sur le moussage du bitume. A ce jour, tous les enrobés LEA[®] étudiés, fabriqués à 90°C, ont été conformes aux spécifications en vigueur pour les enrobés à chaud.

De plus, des efforts supplémentaires doivent encore être faits pour valider la reproductibilité du process, en particulier avec plus de formulations discontinues en couche de surface (bétons bitumineux mince et très mince, béton bitumineux drainant, etc.). Finalement, la validité du procédé dans d'autres pays, avec d'autres matériaux, d'autres climats et d'autres méthodes de formulation des mélanges, doit encore être vérifiée dans les années à venir.

REFERENCES

1. Muncy, S. G. (1993). Cold in-place recycling practices in North America. 5th Eurobitume congress. Vol 1B, paper 4.39, pp 886-889
2. Maccarrone, S. (1994). Cold asphalt system as alternative to hot mix. AAPA.
3. Bitumen emulsions producers' day. (2006). Emulsion World Congress, Lyon.
4. WAM. (2000). Shell Information.
5. Warm foam bitumen, state of art. (2001). AAPA, Note 17.
6. Seeking innovative methods. (2004). World Highway.
7. Warm-Mix Asphalt. (2004). Hot-Mix Magazine 34, Volume 9, N°1, 2004. <http://www.hotmixmag.com>
8. US Department of transportation, Federal Highway Administration, Office of pavement technology. (2005). Warm mix asphalt Technology and Research.
9. Hurley, G. & Prowell, B. (2005). Evaluation of Aspha-min[®] zeolite for use in warm mix asphalt, NCAT Report 05-04, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
10. Hurley, G. & Prowell, B. (2005). Evaluation of Sasobit[®] for use in warm mix asphalt, NCAT Report 05-06, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
11. Lecomte, M., Achimastos, L. & Leroux, C. (2005). Solutions tièdes, un besoin brûlant pour la planète. Re-vue Générale des Routes et Aéroports (RGRA) n°844. [In French]
12. Davidson, J.K. (2005). Evotherm trial–Aurora Ontario. Report by McAsphalt Engineering Services. Toronto.
13. Crews, E. (2006). Emulsion-based warm mix asphalt: materials and field performance. Emulsion World Congress, Lyon.
14. Potti, J.J., Pena, J.L. & Martinez, M. (2006). Warm bituminous mixes with emulsion. A step forward to ecoeffectiveness. Emulsion World Congress, Lyon.
15. Colas, M.M. & Soto, J. (2006). Recyclage demi-tiède avec émulsion bitumineuse. Emulsion World Congress, Lyon.
16. Jenkins, KJ., De Groot, JLA., van de Ven, MFC. & Molenaar, AAA. (1999). Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. CAPSA'99.
17. Koenders, Stockes, Bowen, de Groot, Larsen, Hardy & Wilm. (2000). Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperature. Proceeding of the 2nd Eurobitume & Eurasphalt Congress, Barcelona.
18. Jenkins, KJ., Molenaar, AAA., de Groot, JLA. & van de Ven, MFC. (2002). Foamed Asphalt Produced using Warmed Aggregates. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, USA, Vol. 71.
19. Gaudefroy, V., Olard, F., Cazacliu, B., de La Roche, C., Beduneau, E. & Antoine, J-P. (2007). Laboratory investigations on the mechanical performances of foamed bitumen mixes using half-warm aggregates. Submitted for presentation and publication at the 86th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.
20. Davidson, J.K. & Croteau, J.M. (2006). The influence of the mineral nature and the temperature of the aggregate in the water resistance of foam bitumen stabilized mixes. International Conference on Asphalt Pavements ICAP, Québec.

21. Romier, A., Audéon, M., David, J. & Martineau, Y. (2004). L'enrobage à basse énergie (EBE) aux performances des enrobés à chaud. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)* n°831. [In French]
22. Romier, A., Audéon, M., David, J. & Martineau, Y. (2004). Low energy asphalt (LEA) with performance of hot mix asphalt (HMA). *European Roads Review*, special issue RGRA 2.
23. Romier, A., Audéon, M., David, J., Martineau, Y. & Olard, F. (2006). Low-energy asphalt (LEA) with the performance of hot-mix asphalt, 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
24. Onfield, J-N. (2005). Enrobés à basse température. Du laboratoire au chantier. *Route Actualités/Road News magazine*, N°148. [In French]
25. Olard, F., Le Noan, C. & Huon, P., E.B.T.[®]: les Enrobés à Basse Température. Une nouvelle génération d'enrobés dans la gamme des produits routiers Appia, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*, N°846, février 2006. [In French]
26. Barreto, G. (2006). Warm asphalt mixes containing dispersed water. *Emulsion World Congress*, Lyon.
27. Olard, F., Le Noan, C. & Romier, A. (2007). Les enrobés basse énergie EBE[®] et basse température EBT[®], Bilan des chantiers réalisés en 2005 et 2006, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*, N°854. [In French]
28. Olard, F., Antoine, J.-P., Héritier, B., Romier, A. & Martineau, Y. (2007). LEA[®] (Low Energy Asphalt): a New Generation of Half-Warm Asphalts, To be presented at the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens.
29. Olard, F., Romier, A., Héritier, B. & Martineau, Y. (2008). Low Energy Asphalt (LEA[®]): new half-warm mix asphalt for minimizing impacts from asphalt plant to job site. Submitted to the ISAP Congress on Asphalt Pavements and Environment, Zurich.
30. Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Olard, F. & Nguyen, M.L. (2008). Fatigue behaviour of half-warm mix asphalts. Submitted to the ISAP Congress on Asphalt Pavements and Environment, Zurich.
31. Gaudefroy, V., Olard, F., de la Roche, C., Antoine, J-P. & Beduneau, E. (2008). Laboratory investigations on the Total Organic Compounds emissions of half-warm mix asphalt technology versus traditional hot mix asphalt. Submitted to the ISAP Congress on Asphalt Pavements and Environment, Zurich.
32. Bonvallet, J. (2001). Les enrobés sont pluriels, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*, N°799. [In French]
33. NF EN 12697-26, « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26 : Rigidité ». (2004).
34. Olard, F., Noël, F. & Loup, F. (2005). Mesure du module en compression diamétrale des enrobés bitumineux au Centre d'Etudes et de Recherches d'APPIA, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, N°844. [In French]
35. Olard, F., Noël, F. & Loup, F. (2006). Evaluation of modulus testing in indirect tension mode, *International Journal of Road Materials and Pavement Design (IJRMPD)*, Volume 7.
36. B. Gustavsson and U. Lillbroanda. (1996). Nynas Workability Test, *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Strassbourg (France).
37. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud. (2005). Groupe de travail RST « Formulation des enrobés à chaud », sous la direction de Jean-Luc DELORME. [In French]