

Prix AIPCR du développement durable

LES ENROBÉS À BASSE TEMPÉRATURE

Par François OLARD, Ingénieur Recherche & Développement et Claude LE NOAN, Ingénieur Matériel. EIFFAGE. (France)

Photos et figures © EIFFAGE

PIARC Prize for Sustainable development

LOW ENERGY ASPHALTS

By François OLARD, Research & Development Engineer et Claude LE NOAN, Equipment Engineer. EIFFAGE. (France)

Pictures and figures © EIFFAGE

Le contexte haussier du prix de l'énergie encourage le changement des mentalités et des habitudes et la promotion de technologies nouvelles d'enrobage. Des procédés d'enrobage à plus basses températures, et donc économes en énergie, apparaissent ainsi depuis quelques années. Moins d'énergie pour fabriquer implique également moins de rejet de CO₂. Ces enrobés à basses températures de fabrication et de mise en œuvre présentent donc un double avantage à la fois économique et environnemental. Cependant, ces nouvelles générations d'enrobés se doivent de conserver les mêmes performances que les enrobés à chaud traditionnels ; leur développement est donc conditionné par la vérification en laboratoire et in-situ de leurs performances mécaniques.

La présente proposition d'innovation que sont les enrobés à basse température (E.B.T.[®]) s'inscrit dans le cadre du respect de l'environnement en phase de réalisation des travaux d'entretien et de construction neuve des chaussées.

Cet article présente de manière succincte les approches techniques existantes, les enjeux énergétiques et environnementaux qui y sont associés.

TERMINOLOGIE

La Figure 1 illustre les différentes familles d'enrobés classées en fonction de leur température d'enrobage telles que décrites dans la littérature technique :

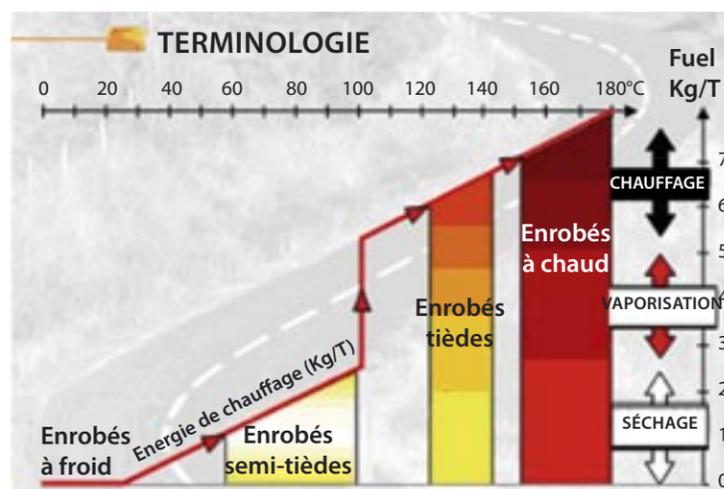
- les enrobés à froid (« Cold Mix Asphalt »), fabriqués à température ambiante,
- les enrobés semi-tièdes (« Half-Warm Mix Asphalt »), fabriqués en deçà du point d'ébullition de l'eau, entre 60 et 100°C,
- les enrobés tièdes (« Warm Mix Asphalt »), fabriqués entre 120 et 140°C selon le procédé de fabrication retenu,
- les enrobés à chaud (150 à 180°C) traditionnels (« Hot Mix Asphalt »).

Les enrobés tièdes et semi-tièdes sont tous deux économes en énergie, mais dans des proportions différentes : les enrobés tièdes –fabriqués à 130°C– permettent des économies d'énergie de l'ordre de 20 %, tandis que les enrobés semi-tièdes –fabriqués en deçà de 100°C– permettent des économies d'énergie d'environ 50 %. Le bilan énergétique, calculé selon les principes théoriques, est confirmé après la fabrication par le relevé de consommation en centrale.

APPROCHES EXISTANTES

Les procédés d'enrobés tièdes existants (additifs organiques ou minéraux, liants spéciaux, double enrobage avec bitume mou (pénétrabilité de 300) et mousse de bitume dur), fabriqués à 130°C environ, permettent des gains en température de l'ordre de 30°C avec, généralement, un

Figure 1 : Energie nécessaire au chauffage d'une tonne de granulats humides



The ever-increasing price of energy encourages a change of thinking and habits and the promotion of new coating technologies. Coating processes at lower temperatures and hence economical and energy saving, have been appearing for some years. Less energy needed for manufacture likewise implies a smaller discharge of CO₂. These road-surfacing materials coated and used at lower temperatures, accordingly offer a dual advantage in terms of both economy and the environment. However, the new generation of low-temperature and low-energy asphalts must have the same performance as traditional hot-mix asphalts; their development is therefore subject to laboratory and in-situ verification of their mechanical performance.

The present innovation proposal, which concerns low energy asphalts (LEA[®]) fits into the context of protecting the environment at the stage of carrying out work of maintenance and construction of new roads.

This article is a brief overview of the existing technology, and the related energy and environmental issues.

Figure 1. Energy needed to heat 1 ton of humid aggregates

TERMINOLOGY

Figure 1 illustrates the different types of asphalt mixes in relation with their coating temperature and corresponding consumed heating energy, as described in the literature:

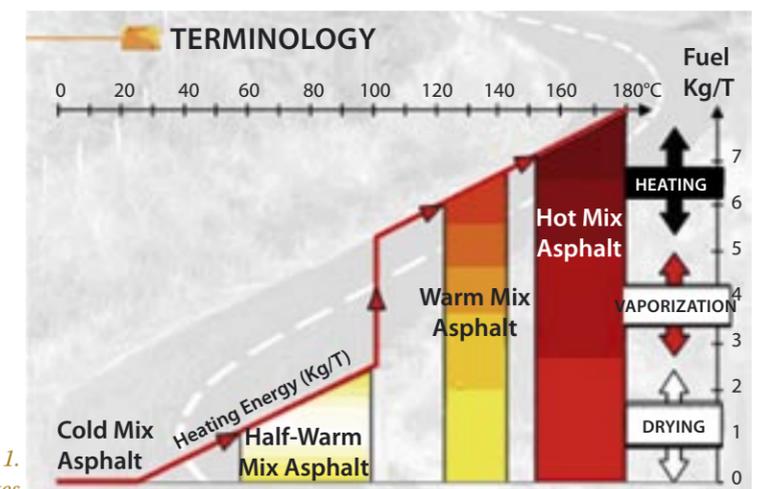
- cold mix asphalt (CMA), usually produced at ambient temperature,
- half-warm mix asphalt (HWMA), manufactured at temperatures below water vaporization, ranging from 60 to 100°C,
- warm mix asphalt (WMA), produced at temperatures ranging from 120 and 140°C,
- hot mix asphalt (HMA), usually manufactured at 150-180°C.

Both the half-warm- and the warm-mix asphalts are economical in terms of energy, but in different

proportions; the warm mix asphalts made at 130°C make possible energy savings of the order of 20%, whilst the half-warm mix asphalts made at below 100°C make possible energy savings of the order of 50%. The energy-related balance calculated on theoretical principles is confirmed after manufacture by a follow-up of consumption at the asphalt plant.

EXISTING APPROACHES

Existing warm mix asphalt processes (organic or mineral additives, special binders, double coating using soft bitumen (penetrability of 300) and hard bitumen foam) made at about 130°C make possible temperature gains of the order of 30°C generally with an excess cost of manufacture due to the use of an additive or to a more complex manufacture and/or a somewhat lower rhythm. Energy savings are of the order of 20%.



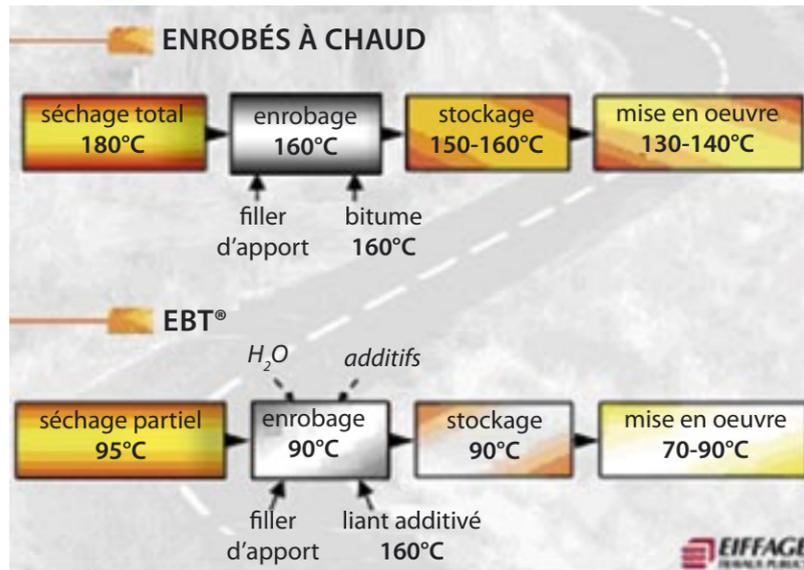


Figure 2 : Principe de l'EBT

surcoût de fabrication dû à l'emploi d'additif ou à une fabrication plus complexe et/ou à une cadence légèrement plus faible. Les économies d'énergie sont de l'ordre de 20 %.

Les différents procédés alternatifs de fabrication d'enrobés semi-tièdes à température inférieure à 100°C sont plus récents et peu nombreux. Le cycle d'introduction des composants du mélange est modifié, les économies d'énergie sont de l'ordre de 50 % (35 à 60 % selon les procédés, les centrales et les matériaux utilisés) et les performances de l'enrobé apparaissent équivalentes à celles de l'enrobé à chaud traditionnel. En revanche, ces procédés ne conviennent pas tous à l'ensemble des types de centrales ou nécessitent des aménagements de celles-ci. Le procédé présenté ici a été développé de façon à ce que tout type de centrale puisse aisément le fabriquer, sans modification coûteuse.

ENJEUX ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

La réduction de la facture énergétique en centrale constitue un facteur important de compétitivité face aux incertitudes sur le prix de l'énergie pétrolière ou gazière.

Les 50 % d'économies d'énergie lors de la fabrication d'une tonne d'EBT correspondent à environ 40 kWh. Pour rappel, les facteurs d'émission sont proches de 200 kg CO₂/MWh pour le gaz naturel et de 270 kg CO₂/MWh pour le

fuel. Sachant que sur le parc français des postes, 60 % fonctionnent au fuel et 40 % fonctionnent au gaz naturel, on obtient une économie moyenne d'émission de CO₂ de l'ordre de 9,68 kg CO₂/T. En France, 45 millions de tonnes d'enrobés à chaud sont produites annuellement, les émissions de CO₂ pourraient ainsi diminuer de près de 450 000 T/an. À titre de comparaison, les objectifs fixés par le Plan Climat 2004 en France, se basent sur une réduction de 54 millions de tonnes d'équivalent CO₂ à l'horizon 2010.

Les enrobés à basse température permettent en outre d'anticiper le système de limitation des émissions de gaz à effet de serre et le futur élargissement du système d'échange des quotas d'émission de CO₂. L'octroi de crédits d'émission pourra alors, par la revente de surplus, accentuer encore la compétitivité de ces enrobés.

De plus, ils sont compatibles avec l'utilisation d'agrégats d'enrobés recyclés et sont eux-mêmes recyclables comme les enrobés classiques.

DESCRIPTION DE L'INNOVATION

UN PROCÉDÉ ORIGINAL

Une grande partie de l'énergie, sur un poste de production d'enrobés, est dépensée pour la vaporisation de l'eau. La chaleur latente de vaporisation de l'eau maintient, en effet, les granulats à 100°C pendant la durée du processus. Le principe de fabrication de l'EBT consiste à sécher partiellement le squelette granulaire de façon à tirer parti de l'eau naturelle résiduelle des granulats lors de l'étape d'enrobage (figure 2). Un apport d'eau peut éventuellement être fait avant l'introduction du bitume et la phase de malaxage humide de l'enrobé, de manière à mieux contrôler la teneur en eau résiduelle du mélange.

Cette siccité partielle réduit considérablement l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau (très énergivore), l'eau résiduelle fait mousser naturellement le bitume, créant ainsi spontanément l'auto-expansion du bitume et l'enrobage des granulats. L'auto-expansion du bitume (favorisée

The different alternative processes of making half-warm-coated road-surfacing materials at a temperature below 100°C are fewer and more recent. The cycle of introduction of mix components is modified and energy savings are of the order of 50% (35 to 60% according to the processes, the asphalt plants and the materials used). Furthermore, the performance of such half-warm mix asphalts appears to be equivalent to that of traditional hot mix asphalts. Nonetheless, all these processes are not suitable for all types of plants; they may necessitate some modifications of these. The process presented in this paper has been developed such that every type of asphalt plant can easily manufacture it without costly modification.

ENERGY RELATED AND ENVIRONMENTAL STAKES

The reduction of the in-plant energy consumption constitutes an important competitive factor in the light of uncertainties of the price of petroleum- or gas-derived energy.

The 50% energy saving on the manufacture of 1 ton of LEA corresponds to approximately 40 kWh. As a reminder, the emission factors are close to 200 kg of CO₂/MWh for natural gas and 270 kg CO₂/MWh for fuel and, as 60% of the French plants run on fuel and the other 40% on natural gas, the average fall in CO₂ emission is about 9.68 kg per ton of LEA. Since nearly 45 million tons of HMAs (hot mix asphalts) are annually produced in France, the CO₂ emissions could be

reduced by almost 450,000 tons a year. In comparison, the objectives set by the French 2004 Climate Plan, are based on a reduction of 54 million tons of equivalent CO₂ by 2010.

The LEAs moreover make it possible to anticipate a system of restriction of emissions of greenhouse gases and the future generalization of the exchange system of CO₂ emission quotas. The grant of emission credits could then, by means of resale of the surplus, place further emphasis on the competitiveness of these low-energy and low-temperature asphalts.

Moreover, they are compatible with the use of recycled asphalt pavement aggregates and they are themselves recyclable like classical hot mix asphalts.

DESCRIPTION OF THE INNOVATION

ORIGINAL MANUFACTURING PROCESS

A large part of the energy at an asphalt plant is expended for the water vaporization. In fact, the latent heat of steam maintains the aggregates at 100°C throughout the process (the conversion of water into steam requires the latent heat of steam to be overcome). The LEA manufacturing process consists in partially drying the granular skeleton in such a way as to take advantage of the residual natural water from the aggregates during the coating stage (figure 2). Prior to the introduction of bitumen, the possible addition of water enables a better control of the mix residual water content.

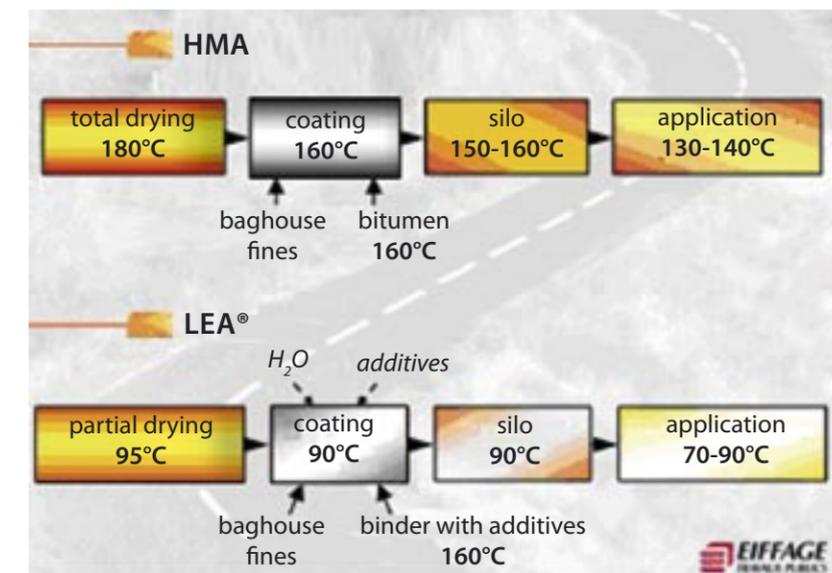


Figure 2: LEA manufacturing principle

Les enrobés à basse température

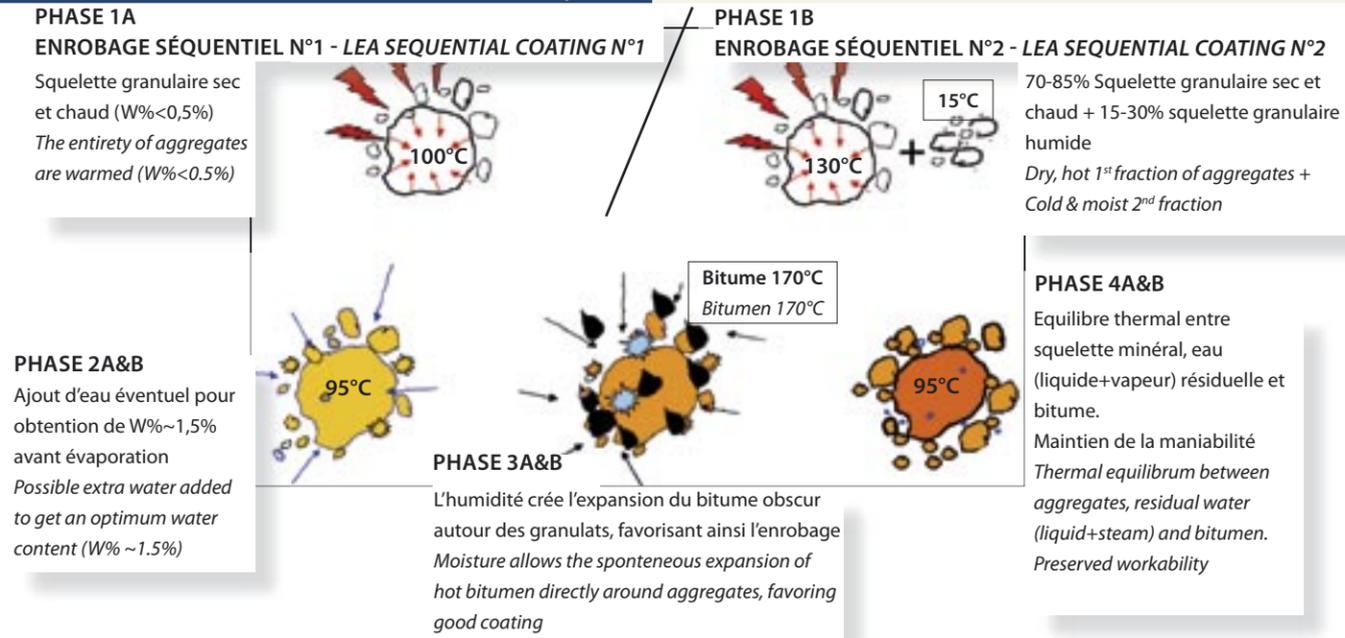


Figure 3 (A-B) : Séquences d'enrobage à basse température E.B.T.
Figure 3 (A-B): LEA[®] processes

le cas échéant par l'emploi d'additifs) ainsi que la teneur en **eau résiduelle** de l'enrobé bitumineux à 90°C tendent à diminuer la viscosité du mélange lui donnant une bonne **maniabilité**, même à ce niveau de températures dites « semi-tièdes ».

DEUX VARIANTES DE SÉCHAGE

Deux variantes de séchage « partiel » ont été étudiées en laboratoire en 2004, puis validées sur les principaux types de postes en 2005 et 2006. La *figure 3 (A-B)* illustre ces deux variantes de séchage partiel du squelette granulaire (i.e. laissant subsister une teneur en eau résiduelle).

Ce process va à l'encontre de l'usage consistant à prôner la dessiccation totale des granulats à la fabrication pour obtenir un « bon » enrobé à chaud. Le stockage du sable et des recyclés sous couvert/hangar, pour favoriser le séchage à l'air, n'est plus indispensable dans le cas présent.

UNIVERSALITÉ ET ADAPTABILITÉ DU PROCÉDÉ AUX DIFFÉRENTS TYPES DE POSTES D'ENROBÉS

L'enrobé à basse température peut être fabriqué sur tout type de centrale d'enrobés selon les méthodes d'enrobage

séquentiel n°1 ou 2, que la dite centrale soit de type continu ou discontinu. Ce point est essentiel dans la caractérisation du caractère innovant et réaliste du procédé par comparaison à certains procédés homologues.

Postes continus avec séchage à flux parallèle ou à contre courant

Selon la méthode N°1, tous les granulats sont chauffés et passent près de la flamme, tandis que selon la méthode N°2, une partie des matériaux (vierges ou agrégats d'enrobés recyclés) est introduite par l'anneau de recyclage généralement présent sur ces postes continus.

Dans le cas des postes à séchage en flux parallèle, la **zone de moussage et de malaxage** est traversée par les gaz, ce qui n'est pas le cas des postes à séchage en contre courant où la zone de moussage et de malaxage se situe juste derrière la flamme. Par voie de conséquence, même si la faisabilité et le caractère industriel de la fabrication de l'EBT est acquise sur les deux types de postes (séchage à flux parallèle ou à contre courant), la fabrication d'EBT sur postes avec séchage à flux parallèle peut requérir toutefois un système d'ajout d'eau de manière à contrôler la teneur en eau résiduelle des matériaux et par là même le phénomène de moussage.

Low energy asphalts

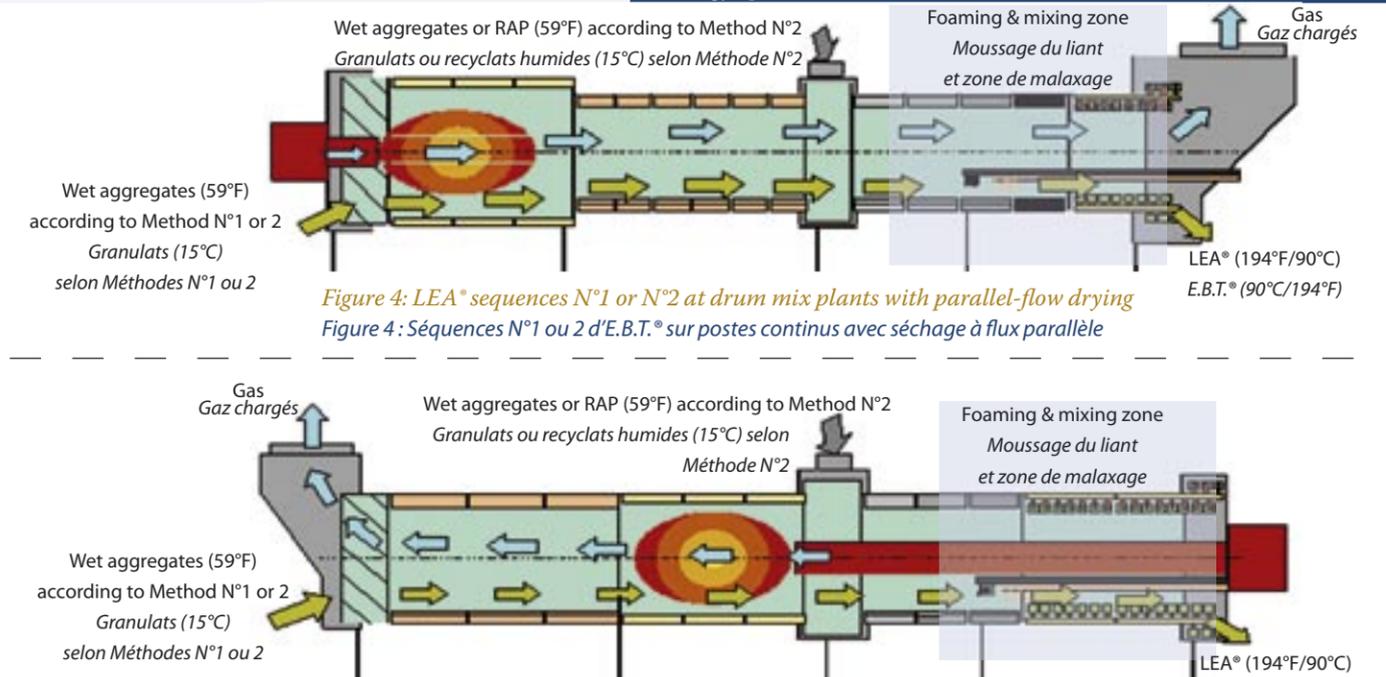


Figure 4: LEA[®] sequences N°1 or N°2 at drum mix plants with parallel-flow drying
Figure 4: Séquences N°1 ou 2 d'E.B.T.[®] sur postes continus avec séchage à flux parallèle

Figure 5: LEA[®] sequences N°1 or N°2 at drum mix plants with counter-flow drying
Figure 5: Séquences N°1 ou 2 d'E.B.T.[®] sur postes continus avec séchage à contre courant

This kind of partial drying process considerably reduces the amount of energy needed to remove water (very energy-consuming), the residual water causes the bitumen to foam naturally at the surface of aggregates, thus spontaneously creating the auto-expansion of the binder and thus the very good coating of aggregates. The **bitumen auto-expansion** (if necessary assisted by the use of additives) as well as the mix residual water content at 90°C, tend to **reduce the mix viscosity**, conferring on it good **workability**, even on the level of these so-called half-warm temperatures below 100°C.

TWO VARIANTS OF DRYING

Two variants of “partial” drying were studied in 2004 in the laboratory and then validated on the main types of plants in 2005 and 2006.

Figure 3 (A-B), left page, illustrates these two variants of partial drying of the granular skeleton (i.e. leaving the residual water content in place).

This process goes against the conventional practice of recommending a complete desiccation of aggregates, in order to achieve a “good” hot bitumen-coated road-surfacing material. The storage of sand and of reclaimed asphalt pavement aggregates (RAP) under cover / in a hangar to promote drying in air, is not any longer necessary in the present case.

UNIVERSALITY AND ADAPTABILITY OF THE PROCESS TO DIFFERENT TYPES OF ASPHALT PLANTS

Low Energy Asphalt can be produced in any type of plant using sequential

coating methods n°1 or 2, whether the said plant is of the continuous or of the discontinuous type. This aspect is essential in the description of the present process as being innovative and realistic, compared with certain equivalent processes.

Drum mix plants with parallel-flow or counter-flow drying

According to method N°1, all aggregates are heated and pass close to the flame, whilst according to method N°2, part of the materials (virgin or reclaimed materials) is introduced via the recycling ring, which is generally present at these drum mix plants.

In the case of parallel-flow drying stations, the **foaming and mixing zone** is traversed by gases, which is not the case with counter-flow

Les figures 4 et 5, page précédente, illustrent des configurations de postes très souvent rencontrées en France et à l'étranger. Beaucoup plus rarement, les postes continus sont pourvus d'un malaxeur en continu séparé ; la faisabilité des EBT sur ces postes a également été validée.

Postes discontinus

Le synoptique d'une fabrication d'EBT selon la méthode N°2 sur un poste discontinu est donné en figure 6. Pour la méthode N°1, sur ce type de poste comme sur les postes continus, tous les granulats sont chauffés à 95°C (séchage partiel) avant enrobage.

BILAN ENERGETIQUE COMPARATIF

Le calcul énergétique théorique est mené au cas par cas selon le poste considéré, la méthode de séchage partiel utilisée (N°1 ou N°2), l'humidité de chacune des coupures granulaires et des agrégats d'enrobés recyclés éventuellement utilisés. Le calcul énergétique (tableau 1, page suivante) n'est qu'un exemple donné, relatif aux conditions particulières suivantes :

- chaleur spécifique du granulat $c_g = 850 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$,
- chaleur de l'eau $c_w = 4,2 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$,
- chaleur latente d'évaporation de l'eau $L_v = 2\,250 \text{ kJ/kg}$,
- chaleur spécifique de la vapeur d'eau $c_v = 1,85 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$,
- teneur en eau moyenne des granulats : 3,5 %,
- température extérieure : 10°C.

Le relevé de la consommation grâce au compteur gaz ou fuel des postes confirme l'ordre de grandeur de 40 à 50 % d'économies d'énergie réalisées grâce au procédé d'enrobage à basse température proposé. La réduction d'émission en CO_2 qui en résulte est du même ordre que l'économie de carburant calculée.

BILAN PERFORMANTIEL

Contrairement aux enrobés à froid, les enrobés semi-tièdes présentent des performances équivalentes à celles des enrobés à chaud. Les études de formulation en laboratoire d'enrobés semi-tièdes EBT permettent d'illustrer leur bon comportement mécanique.

MÉTHODE N°2 GRANULATS/RECYCLÉS HUMIDES PAR :
METHOD N°2 WET VIRGIN AGGREGATES/RAP BY:

1. anneau - ring
2. tapis lanceur - launching carpet
3. pied de l'élevateur - base of elevator
4. directement dans le malaxeur - directly into mixer

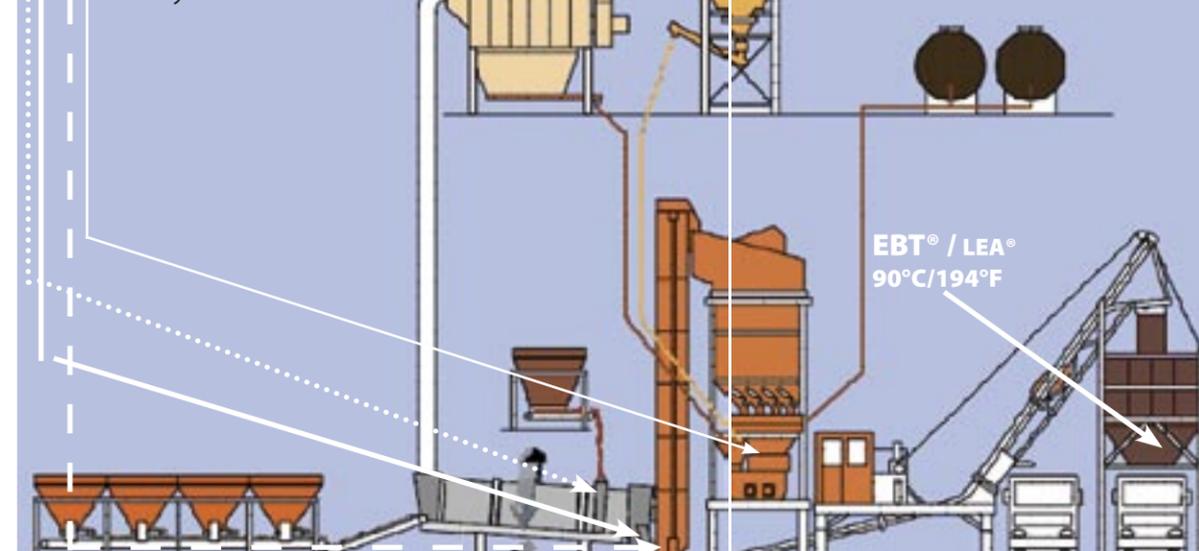


Figure 6 : Enrobage séquentiel N°2 d'enrobé à basse température E.B.T.® sur poste discontinu

Figure 6: LEA® sequential coating N°2 at a batch plant

ÉTUDES DE LABORATOIRE

Une soixantaine d'études de formulation d'enrobés à basse température ont été à ce jour réalisées, démontrant toutes l'équivalence des performances mécaniques des EBT et des enrobés à chaud usuels. Les tableaux 2 et 3, page suivante, présente deux exemples d'études menées sur des formules BBSG0/10 (natures : rhyolite et diorite) avec un bitume de classe 35/50. L'aptitude au compactage (essai PCG), la tenue à l'eau (essai Duriez), la résistance à l'orniérage, le module, ainsi que la résistance à la fatigue, ont été déterminées sur ces mélanges.

SUIVI DE CHANTIER : MESURE DU MODULE EN COMPRESSION DIAMÉTRALE SUR CAROTTES CHANTIER

Dans le cadre du suivi des planches exploratoires et des chantiers expérimentaux, des mesures de module complexe (à 15°C & 10Hz) ou sécant (à 15°C & 0.02s) ont été réalisées sur des carottes prélevées in-situ. La mesure du module complexe ou sécant est effectuée selon la nouvelle norme européenne NF EN 12697-26 en compression diamétrale.

Batch plants

The synopsis of LEA manufacture according to method N°2 at a batch plant appears in figure 6. Concerning method N°1 at this type of station, like at drum plants, all aggregates are heated to 95°C (partial drying) before being coated.

COMPARATIVE ENERGY-RELATED BALANCE

The theoretical energy consumption calculation depends upon the plant under consideration, the method of partial drying (N°1 or N°2), the humidity of each category of aggregates [virgin or reclaimed asphalt pavement (RAP) ones]. The energy requirement calculation (table 1, following page) is only one example relating to the following specific conditions:

- specific heat of the aggregate $c_g = 850 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$,
- heat of water $c_w = 4.2 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$,
- latent heat of evaporation of water $L_v = 2250 \text{ kJ/kg}$,
- specific heat of steam $c_v = 1.85 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$,
- mean aggregate moisture: 3.5 %,
- outside temperature: 10°C.

The follow-up of consumption by the plant gas or fuel meter confirms the order of magnitude of 40 to 50% of energy savings thanks to the proposed low-energy and low-temperature bitumen-coating process. The resulting reduction of CO_2 emission is of the same order as the calculated fuel saving.

PERFORMANCE-BASED CHARACTERIZATION

Unlike cold mix asphalts (CMAs), half-warm mix asphalts (HWMA) have a performance tantamount to that of hot mix asphalts (HMAs). Laboratory formulation studies of LEA HWMA make it possible to illustrate their good mechanical behavior.

LABORATORY STUDIES

Some sixty LEA formulation studies of have been carried out to date, all demonstrating the equivalence between the mechanical performance of LEAs and that of HMAs. Tables 2 and 3, following page, giving two examples of case studies carried out on dense graded asphalts BBSG 0/10 (rhyolite and diorite) using 35/50 pen grade bitumen. The ability to be compacted (PCG test), water resistance (Duriez test), resistance to rutting, stiffness modulus as well as resistance to fatigue were determined on these mixtures.

SITE MONITORING: MEASUREMENT OF THE MODULUS IN INDIRECT TENSION MODE ON FIELD CORES

After application on site, some measurements of the complex and secant moduli in indirect tension (IDT) mode were made on field cores taken on site.

Complex and secant moduli were determined according to the new European Standard NF EN 12697-26 in IDT mode.

TABLEAU 1 - TABLE 1

EXEMPLE 1. BILAN THERMIQUE LIÉ AU CHAUFFAGE DES GRANULATS DE L'ENROBÉ À CHAUD (pour 1 000 kg de granulats secs)
EXAMPLE 1. THERMAL BALANCE LINKED TO THE HEATING OF HMA AGGREGATES (of 1,000 kg of dry aggregates)

Tous les granulats sont chauffés à 160°C
All aggregates are heated up to 160°C

Process / Procédé	Formula / Formule	Energy / Énergie (kJ)
chauffage du granulat / heating of aggregate	$c_g \times 1\,000 \text{ kg} \times (160^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$	127 500 kJ
chauffage de l'eau / heating of water	$c_w \times (1\,000/965-1)1\,000 \times (100 - 10)$	13 710 kJ
évaporation de l'eau / water vaporization	$L_v \times (1\,000/965-1) \times 1\,000$	81 606 kJ
chauffage de la vapeur d'eau / heating of steam	$c_v \times (1\,000/965-1)1\,000 \times (160 - 100)$	4 026 kJ
Total :		227 MJ/t

EXEMPLE 2. BILAN THERMIQUE LIÉ AU CHAUFFAGE DE L'ENROBÉ À BASSE TEMPÉRATURE EBT N°1 (pour 1 000 kg de granulats)
EXAMPLE 2. THERMAL BALANCE LINKED TO THE HEATING OF LEA N°1 AGGREGATES (of 1,000 kg of dry aggregates)

Granulats chauffés à 100°C (chute de température entre sécheur et malaxeur du poste de 10°C)
Aggregates heated up to 100°C (slight temperature drop between dryer and plant mixer)

Process / Procédé	Formula / Formule	Energy / Énergie (kJ)
chauffage du granulat / heating of aggregate	$c_g \times 1\,000 \text{ kg} \times (100^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$	76 500 kJ
chauffage de l'eau / heating of water	$c_w \times (1\,000/965-1)1\,000 \times (100 - 10)$	13 710 kJ
évaporation partielle de l'eau / partial water vaporization	$0,5L_v \times (1\,000/965-1)1\,000$	40 803 kJ
Total :		131 MJ/t

L'énergie de chauffage est réduite de 96 MJ/t, i.e. de 42,3 % !
The heating energy requirement is thus reduced by 96 MJ/t = 42.3%!

EXEMPLE 3. BILAN THERMIQUE LIÉ AU CHAUFFAGE DE L'ENROBÉ À BASSE TEMPÉRATURE E.B.T.® N°2
 (pour 1 000 kg de granulats séchés à 130°C)
EXAMPLE 3. THERMAL BALANCE LINKED TO THE HEATING OF LEA N°2 AGGREGATES
 (for 1,000 kg of aggregates dried at 130°C)

Si 35 % des granulats sont introduits humides à l'ambiante et si les 65 % de granulats restants sont chauffés à 130°C environ dans le sécheur, le calcul est comme suit :
If 35% of aggregates is introduced in a humid state at ambient temperature and if 65% of aggregates is heated to approximately 130°C in the dryer, the calculation is the following:

Process / Procédé	Formula / Formule	Energy / Énergie (kJ)
chauffage du granulat / heating of aggregate	$c_g \times 1\,000 \text{ kg} \times (130^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})$	102 000 kJ
chauffage de l'eau / heating of water	$c_w \times (1\,000/965-1)1\,000 \times (100 - 10)$	13 710 kJ
évaporation de l'eau / water vaporization	$L_v \times (1\,000/965-1)1\,000$	81 606 kJ
chauffage de la vapeur d'eau / heating of steam	$c_v \times (1\,000/965-1)1\,000 \times (130 - 100)$	2 013 kJ
Sous-Total (Sub-total)		199 329 kJ
Pour 1 000 kg d'EBT (Per 1,000 kg of LEA) : Total	$0,65 (0.65) \times 199\,329 =$	129,5 (129.5) MJ/t

L'énergie de chauffage est donc ici théoriquement réduite de 97,5 MJ/t, i.e. de 43 % !
The heating energy requirement is theoretically reduced by 97.5 MJ/t = 43%!

TABLE 2. MIX DESIGN OF THE LEA RHYOLITE BBSG 0/10 COMPARED WITH THE CONTROL HMA
 TABLEAU 2. EXEMPLE D'UNE ÉTUDE DE FORMULE BBSG2 0/10 RHYOLITE EBT OPTIMISÉE

Material / Matériau	BBSG2 0/10 Baglione, binder 35/50 / BBSG2 0/10 Baglione, Liant 35/50	
	HMA / Enrobé à chaud (160 °C)	LEA / EBT® (90 °C) + 1% Ca (OH) ₂
PCG Test (60 gyrations) Essai PCG (60 girations)	7.8% 7,8 %	6.2% 6,2 %
Duriez Test / Essai Duriez	R = 11.3 (11,3) MPa ; r/R = 0.69 ¹ (0,69) ¹	R = 10.3 (10,3) MPa ; r/R = 0.78 (0,78)
French Wheel Tracking Test (60°C; 30,000 cycles) Essai Orniérage (60°C; 30 000 cycles)	5.4% 5,4 %	5.9% 5,9 %
Complex Modulus (15°C-10Hz) Module complexe (15°C-10Hz)	Samples at 6.5% voids 10,100 MPa Eprouvettes à 6,5 % de vides 10 100 MPa	Samples at 5.2 % voids 9,300 MPa Eprouvettes à 5,2 % de vides 9 300 MPa
Secant Modulus (15°C-0.02s) Module sécant (15°C-0,02s)	Samples at 5.8 % voids 9,300 MPa Eprouvettes à 5,8 % de vides 9 300 MPa	Samples at 5.5 % voids 8,200 MPa Eprouvettes à 5,5 % de vides 8 200 MPa

¹This value is lower than the specification of a minimum ratio r/R of 0.75. This comparison of performances of HMA with LEA*, for a given granulometric curve, is nevertheless significant.

¹Cette valeur est inférieure à la spécification d'un rapport r/R minimum de 0,75. Cette comparaison des performances de l'enrobé à chaud et de l'E.B.T.®, à courbe granulométrique fixée, est néanmoins significative.

TABLE 3. MIX DESIGN OF THE LEA DIORITE BBSG 0/10 COMPARED WITH THE CONTROL HMA
 TABLEAU 3. EXEMPLE D'UNE ÉTUDE DE FORMULE BBSG2 0/10 DIORITE EBT

Matériau	BBSG2 0/10 La Noubleau, Liant 35/50 / BBSG2 0/10 La Noubleau, Liant 35/50	
	HMA / Enrobé à chaud (160 °C)	LEA / EBT® (90 °C)
PCG Test (60 gyrations) Essai PCG (60 girations)	9.1% 9,1%	7.1% 7,1%
Duriez Test / Essai Duriez	R = 11.7 (11,7) MPa ; r/R = 0.98 (0,98)	R = 10.8 (10,8) MPa ; r/R = 0.84 (0,84)
French Wheel Tracking Test (60°C; 30,000 cycles) Essai Orniérage (60°C; 30 000 cycles)	6.4 % 6,4 %	6.5% 6,5%
Fatigue Test (10°C, 25Hz)	Samples at 3% voids E*(10°C-25Hz) = 15,700MPa E ₆ = 105 µm/m & slope b = -0.19 Estimate at 5.4 % voids (LPC method) 97.08 µm/m	Samples at 5.4% voids E*(10°C-25Hz) = 14,400MPa E ₆ = 97 µm/m & slope b = -0.17 Estimate at 3% voids (LPC method) 104.92 µm/m
Essai Fatigue (10°C, 25Hz)	Eprouvettes à 3 % de vides E*(10°C-25Hz) = 15 700 MPa E ₆ = 105 µm/m & pente b = -0,19 Estimation à 5,4 % de vides (méthode LPC) 97,08 µm/m	Eprouvettes à 5,4 % de vides E*(10°C-25Hz) = 14 400 MPa E ₆ = 97 µm/m & pente b = -0,17 Estimation à 3 % de vides (méthode LPC) 104,92 µm/m

Figures 7A et 7B: Isothermes à 15°C du module d'enrobés à chaud témoins et de 2 variantes de production possibles d'E.B.T.®

Les figures 7A et 7B montrent que les valeurs de module obtenues sur des carottes chantier d'enrobé à basse température ou d'enrobé à chaud témoin (3 éprouvettes testées pour chaque matériau), sont proches.

REFERENCES 2005-06 ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

L'année 2005 a été consacrée à la vérification de la faisabilité en grandeur réelle du procédé d'enrobage à basse température sur une dizaine de planches exploratoires ainsi que sur quatre chantiers de démonstration en France. Cette première série d'expérimentation en grandeur réelle a permis de vérifier la **reproductibilité de la démarche**, avec divers types de matériaux, de formules d'enrobés, de postes –aussi bien continus que discontinus avec séchage en flux parallèle ou à contre courant– et différents matériels de mise en œuvre. Le liant est le plus souvent un bitume pur de classe 35/50 –plus rarement de classe 20/30 ou 50/70–, modifié le cas échéant par l'adjonction d'un **additif** multi-fonctionnel de manière à optimiser sa moussabilité, la qualité d'enrobage, et par là même les performances de l'EBT.

En 2006, déjà plusieurs milliers de tonnes d'EBT ont été fabriquées sur dix-sept postes. Les photographies (1 et 2, A-D) illustrent certains exemples types de planches expérimentales et de chantiers tests réalisés au cours des années 2005 & 2006.

Les principaux chantiers tests ont été réalisés à partir de productions de six postes.

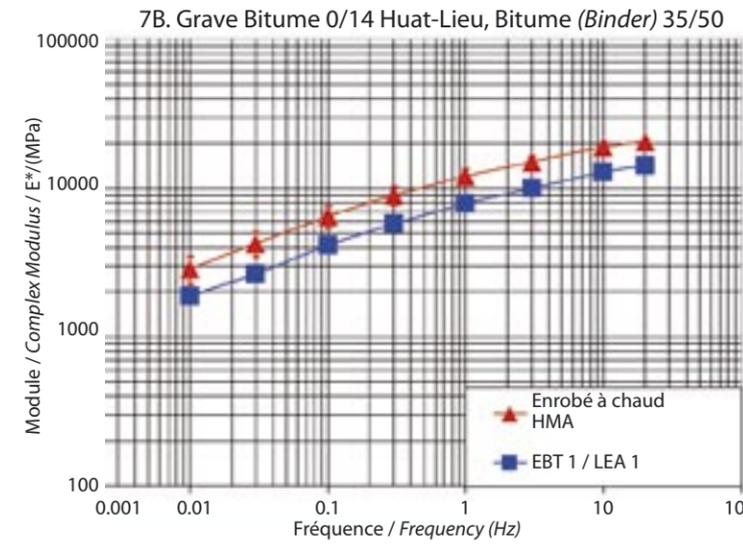
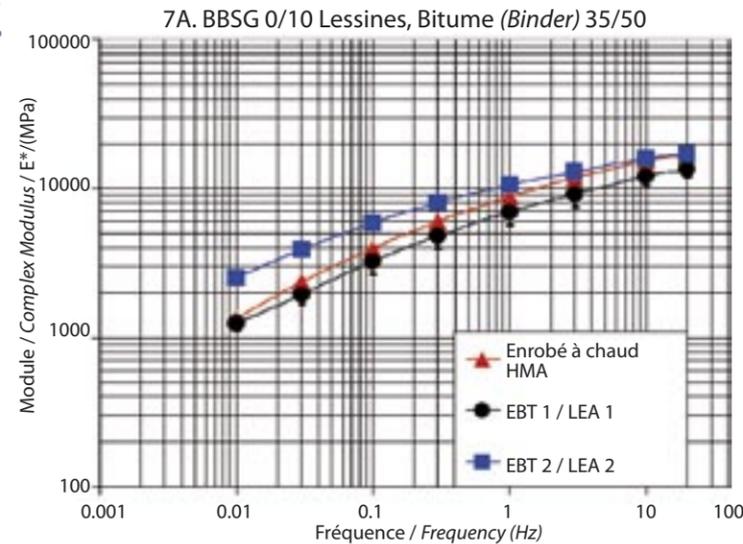


Figure 7A and 7B: Isotherms at 15°C of the stiffness modulus of 2 LEA's (2 double production methods N°1 and N°2) and of the reference HMAs

Figure 7A and 7B shows that the modulus values obtained for HMA and LEA are close (3 samples tested for each material).

2005-06 REFERENCES & PROSPECTS

The year 2005 was devoted to the verification of the feasibility of large-scale performance of the proposed process of low-energy and low-temperature bitumen coating on a dozen exploratory boards, as well as at four demonstration sites in France. This first series of large scale experiments has enabled to verify the **reproducibility of the process** using various types of materials, coating formulations at batch plants as well as drum mix plant with parallel-flow and counter-flow drying. The most frequent binder used is 35/50 pen grade bitumen, more rarely category 20/30 or 50/70 generally modified with a multifunctional **additive** such as to optimise foaming capacity, the quality of coating and hence the performance of LEA.

In 2006, almost ten thousand tons of LEAs have already been manufactured at **seventeen** different asphalt plants. The photographs (1 and 2, A-D) illustrate certain typical examples of experimental boards and of test sites implemented during the years 2005 and 2006.

The main demonstration sites have been carried out from production at six plants.



PREMIÈRES PLANCHES EXPLORATOIRES EN 2005
Photos 1A-D: Planche de BBSG 0/10.
Température ext: 0°C. Fabrication à 96°C. Mise en œuvre à 85°C.



FIRST FRENCH EXPLORATORY BOARDS IN 2005
Photos 1A-D:
Board of LEA® BBSG 0/10. Outside temperature 0°C,
manufactured at 96°C, used at 85°C.



Photos 2A-D: E.B.T.® en formules GB 0/14.
Température ext: 10°C, fabrication: 95°C, application: 75°C.



Photos 2A-D:
LEA's formulas GB0/14. Outside temperature 10°C,
manufactured at 95°C, used at 75°C.

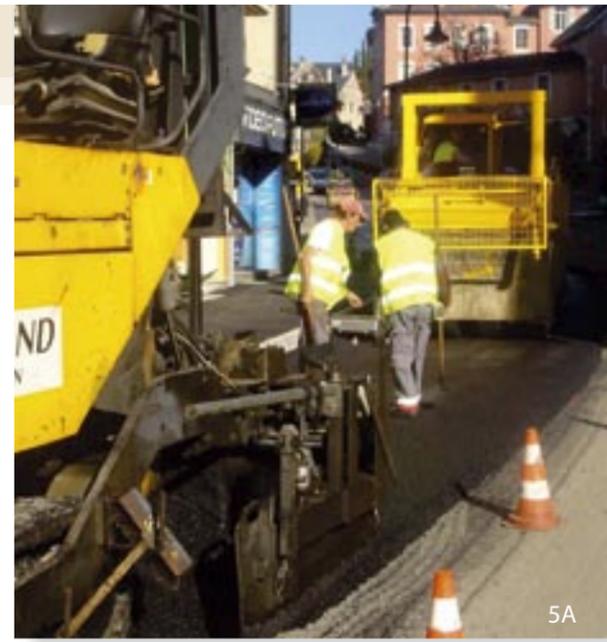


Photo 3: GBO/14 & BBSG0/10 near Ciry (02)
 Photo 4: BBSG0/10 in Englesqueville (14)
 Photos 5A and 5B: Start of site test, LEA® BBME 0/10 (20% RAP) in Chambéry (73).
 Photos 6A-D: End of roadwork of LEA®, BBME 0/10 (20% RAP) in Chambéry (France, 73).
 Photo 7A: LEA® BBSG 0/10 in Montlouis-sur-Loire (France, 37).
 Photo 7B: Clean finisher screw.

Photo 3 : GBO/14 & BBSG0/10 sur RD à Ciry (02)
 Photo 4 : BBSG0/10 sur RD à Englesqueville (14)
 Photos 5 A et 5 B : Début de chantier test en BBME 0/10 E.B.T.® (20 % de recyclés) à Chambéry (73).
 Photos 6 A-D : Fin du chantier d'E.B.T.® en BBME 0/10 (20 % de recyclés) à Chambéry (73).
 Photo 7A : E.B.T.® BBSG 0/10 à Montlouis-sur-Loire (37).
 Photo 7B : Vis du finisseur propre.

Ces premiers chantiers ont donné pleine satisfaction (photos 6 et 7). L'application est classique, i.e. avec les matériels de mise en œuvre identiques à ceux des enrobés à chaud témoins. La fréquence des tampers du finisseur et l'énergie de compactage (nombre de passes) sont néanmoins légèrement plus élevées afin d'obtenir le niveau de compacité requis. La photo 5B montre, en outre, l'absence de salissures sur les parois d'une benne de camion : la formation d'une pellicule de vapeur d'eau, re-condensée en fines gouttelettes sur les parois, engendre une réduction des salissures et donc une diminution de l'utilisation de solvants. L'enrobé étant mis en œuvre à température inférieure à 100°C, les propriétés nominales sont atteintes rapidement, dès son refroidissement (photo 6B).



These first test sites have given full satisfaction (photos 6 and 7). The application is a classical one, i.e. using application equipment identical to that used for the control hot mix asphalts. Yet, the frequency of finisher tampers and compacting energy (number of passes) are slightly higher, in order to obtain the required level of compactness and final density. Photo 5B shows that LEA does not stick in the lorry tipper; the formation of a skin of steam condensed as fine water

droplets on surfaces brings about a reduction of soiling and hence a reduction in the use of solvents. The LEA is used at below 100°C, the nominal properties are rapidly reached on cooling (photo 6B).

Surface appearance is traditional; levels of macro-texture and skid resistance measured on wearing courses BBSG & BBME of these first sites are suitable. (0.55<HSv<0.85).

L'aspect de surface est traditionnel, les niveaux de macrotecture mesurés sur les revêtements BBSG et BBME de ces premiers chantiers tests sont satisfaisants ($0,55 < H_{sv} < 0,85$).

MISE EN ÉVIDENCE DU CARACTÈRE INNOVANT

Le caractère innovant du procédé se caractérise par :

- **l'auto-expansion du bitume**, i.e. formation naturelle de mousse de bitume en **tirant parti de l'humidité naturelle (libre et liée) des matériaux**. La formation de mousse au contact bitume chaud-granulat humide (froid ou tiède) remet en cause l'utilisation de mousse de bitume vaporisée sur les granulats ;
- l'adaptabilité des deux variantes d'enrobage séquentiel sur **tout type de postes** sans modification coûteuse de l'outil industriel à l'inverse de nombreux procédés d'enrobés tièdes et semi-tièdes existants ;
- l'adaptabilité des deux variantes à **tout type de mélange hydrocarboné**, toute formule granulaire (continue ou discontinue, pauvre ou riche en sable, avec ou sans agrégats d'enrobés recyclés, etc.), toute nature minéralogique de granulats, tout liant ;
- l'optimisation de la moussabilité des bitumes par ajout d'**additifs spécifiques** ;
- **un relevé d'économie d'énergie sur compteurs** (fuel ou gaz naturel) des postes : **35 à 50 %** selon le poste, les matériaux et l'humidité de ces derniers, la température, etc. ;
- **une économie potentielle de rejets de CO₂ : 35 à 50 %** ;
- **un temps de stockage et de transport pouvant être plus important** que pour un enrobé chaud. En cas de pluie accidentelle ou pour toute autre raison, les camions chargés et bâchés peuvent rester en stand-by quelques heures avant de réapprovisionner le finisseur, évitant ainsi de coûteuses mises en décharge possibles ;
- l'entretien des postes et des matériels de mise en œuvre est facilité de par la formation d'une fine pellicule de vapeur d'eau, re-condensée en fines gouttelettes au niveau des parois. Cela engendre une **réduction des salissures**, voire même un nettoyage du matériel, et par là même une **diminution de l'utilisation de solvants**.

- la quasi-**disparition des nuisances** aux équipes d'application et aux éventuels riverains : absence d'odeurs, d'émanations et de risque de brûlure ;
- **une remise en service plus rapide que pour des enrobés à chaud (160°C) ou à tiède (130°C)** : les propriétés nominales sont obtenues dès le refroidissement ;
- un risque de fumées et de création de brouillard beaucoup plus faible en cas de pluie après la mise en œuvre, améliorant ainsi nettement la sécurité des chantiers ;
- la préservation de **qualités mécaniques équivalentes à celles des enrobés à chaud**.

CONCLUSION

Chefs de postes, responsables d'exploitation et personnels des équipes travaux ayant participé à cette première phase de développement se sont tous appropriés avec enthousiasme cette nouvelle technologie, ce qui, associé à la demande et à la satisfaction des premiers clients, laisse présager d'un développement certain à l'avenir. Mais, comme toute nouvelle technique, il faut l'appréhender et bien la maîtriser dans un premier temps, en particulier par les quelques aménagements et savoir-faire adaptés aux différents postes d'enrobage, comme suggéré dans ce dossier.

À la fin 2007, 100 000 tonnes d'enrobés basse température ont été fabriqués avec des bitumes purs ou modifiés en France, en Espagne, ainsi que dans l'état de New-York aux Etats-Unis.

Des efforts supplémentaires restent encore à fournir pour poursuivre et mener à bien la reproductibilité de la démarche, notamment en l'appliquant plus encore aux formulations discontinues de type BBM, BBTM ou BBD_r, et cela, suivant les deux méthodes d'enrobage séquentiel décrites auparavant. À noter que les premiers chantiers tests en couche de roulement, en formules BBM et BBTM, sur trafic autoroutier ont été réalisés avec succès récemment et seront suivis dans le cadre de la Charte Innovation autoroutière avec le SETRA pendant plusieurs années.#

DEMONSTRATION OF NOVELTY

The innovative nature of the process is characterized by:

- the **auto-expansion of bitumen**, i.e. natural formation of bitumen foam by **taking advantage of the (free and bound) natural humidity of aggregates**. The formation of foam on the contact of hot bitumen with (cold or warm) humid aggregates questions the common use of vaporized bitumen foam on the aggregates;
- the adaptability of the two variants of sequential coating at **any kind of plants** without costly modifications of the industrial equipment, unlike some existing warm and half-warm coating processes;
- the adaptability of both variants to **any type of hydrocarbon mixture**, any form of aggregate formula (continuous or discontinuous, rich or poor sandy fraction, with or without RAP, etc), aggregates of any mineralogical type, any binder;
- the optimization of the foaming capacity of binder by the use of **special additives**;
- **the determination of energy savings** by (fuel or natural gas) meters of plants: **35 to 50%** according to the plant, the materials and their degree of humidity, temperature, etc.;
- **the potential saving of CO₂ emissions : 35 to 50%**;
- **a potentially longer time of storage and transport** than those of a hot mix asphalt (HMA). In the case of accidental rain or for any other reason, loaded lorries

can remain on stand-by for some hours before re-supplying the finisher, thus avoiding possibly costly discharging;

- the maintenance of the plants and equipment used is facilitated by the formation of a fine skin of steam condensed in the form of fine droplets on the surfaces. This brings about a **reduction of soiling** and consequently a **reduction in the amount of solvent used**;
- **the disappearance of harm** caused to application teams and of **nuisance** to neighbors due to the great reduction of odors, emissions and risk of burns;
- **a more rapid return to traffic than in the case of hot (160°C) or warm mix asphalts (130°C)**; the normal properties are obtained after cooling;
- a risk of smoke and formation of a fog much smaller in the case of rain after realization, thus improving site safety;
- the preservation of **mechanical properties equivalent to those of hot mix asphalts**.

CONCLUSION

Heads of plants, operation managers and working teams who participated in this first phase of development have all enthusiastically adopted this new technology which, linked to the demand and satisfaction of the first customers, makes it possible to predict a certainty of future development. Nevertheless, like any new technique, it is initially necessary to learn and to master it, specifically through the use of a certain equipment and know-

how adapted to the different HMA stations as suggested in the present file.

At the end of 2007, 100 000 tons of low energy asphalts have been produced, by using pure binders or polymer modified binders, in France, in Spain and also in the New-York State in the USA.

Additional efforts are still to be made in order to pursue and bring to a successful conclusion the reproducibility of the process, in particular while applying it to more and more discontinuous formulations (porous asphalt, open-graded wearing course) of the BBM, BBTM or even BBD_r type, using the two previously described methods of sequential bitumen coating of asphalts. It is noteworthy that the first test sections of wearing course (asphalt formulas of the French types BBM and BBTM) on high traffic volume motorways have been realized successfully. The follow-up of these test sections will be realised during a few years within the framework of the French "Charte Innovation" with the SETRA (Service of Technical Studies of the Roads and Expressways).#