

L'ENROBE A BASSE ENERGIE

Par Mme N. WAFI Service Recherche CNER

PREAMBULE

Les accords de Kyoto continuent de diviser la planète, néanmoins les pays signataires en définissent les conditions d'application. Chacun s'interroge pour en connaître les répercussions sur son domaine d'activité et son cadre de vie.

C'est dans ce contexte que nous présentons une nouvelle technique d'enrobage, le procédé EBE, qui réduit sensiblement les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

INTRODUCTION

D'une façon générale la température de séchage des granulats est comprise entre 120 et 160°C. Cette opération permet d'évacuer l'eau résiduelle des granulats et tout particulièrement celle de sable. La production de la centrale d'enrobage décroît rapidement avec la teneur en eau de sable.

La température d'introduction du bitume est associée à sa viscosité et à sa pompabilité. Cette température est comprise selon la consistance du bitume entre 150 et 180°C.

L'opération de séchage ou chauffage des granulats est coûteuse énergétiquement et génère des émissions de fumées et de poussières dans l'atmosphère, en dépit dans ce dernier cas de la présence d'un dépoussiéreur en charge d'épurer les gaz d'évacuation et de récupérer les fines en suspension.

L'objectif général de la recherche sur les enrobés tièdes est de réduire la température de séchage des granulats et par voie de conséquence la température d'enrobage des matériaux bitumineux. Ainsi il est possible de diminuer la facture énergétique et les nuisances associées à l'émission de fumées et de poussières dans l'atmosphère et auprès du personnel en charge de la mise en œuvre.

La technique d'enrobage à basse énergie (EBE) concerne la fabrication et la mise en œuvre, à une température inférieure à 100°C, de mélanges enrobés de bitume. Ceux-ci possèdent des performances équivalentes à celles des enrobés à chaud. Cette technique combine l'action de la température, de l'eau et de l'énergie de malaxage sur les constituants de mélange, bitume et squelette minéral. L'originalité du procédé est d'utiliser au mieux les changements d'état du bitume, fluide lorsqu'il est chaud, apte de se transformer en mousse ou à se mettre en émulsion, lorsqu'il est au contact de l'eau. En outre, seul le chauffage des gravillons, à température modérée est nécessaire ; le reste du squelette minéral est utilisé froid et humide. Cette façon de faire économise une part importante de l'énergie nécessaire à l'enrobage et réduit les émissions gazeuses qui en résultent.

I. PRINCIPE DU PROCEDE

Pour assurer un bon enrobage, on cherche à utiliser au mieux l'énergie disponible et à optimiser l'énergie complémentaire nécessaire.

Les objectifs recherchés pour le procédé EBE sont les suivants :

- Limiter l'apport d'énergie complémentaire.
- Obtenir l'enrobage complet de l'ensemble du squelette minéral, des particules les plus fines aux plus grossières.
- Faire en sorte que la température finale de l'enrobé soit inférieure à 100°C (entre 60°C et 80°C).
- Utiliser un seul liant, sans l'aide de solvant.
- Disposer d'un liant stabilisé à la fin de la mise en œuvre.

Pour atteindre ces objectifs, le procédé EBE consiste à :

- Chauffer et sécher les seuls gravillons à moins de 150°C.
- Enrober les gravillons modérément chauffés par la totalité du bitume du mélange à fabriquer (introduit à sa température normale d'utilisation).
- Ajouter le sable contenant les éléments fins du squelette minéral (tel quel, humide et à sa température ambiante).

L'enrobage des différents constituants dans le dispositif de mélange de la centrale est séquentiel (figure ci-dessous) :

1. Le squelette minéral est séparé en deux fractions, d'une part, les gravillons et sables ne contenant pas de fines et, d'autre part, les sables fillérisés contenant des éléments fins.
2. Seuls les gravillons sont séchés et chauffés à une température inférieure à 150°C. Les gravillons et les sables propres ont une faible teneur en eau et ne contiennent pas d'éléments fins. Chauffés, les gravillons emmagasinent de l'énergie calorifique pour, ensuite, la restituer aux éléments froids.

Le chauffage modéré des seuls gravillons conduit à une réduction des dimensions, du

sécheur et du système de dépoussiérage.

3. Le bitume est chauffé à sa température d'utilisation, selon son grade, entre 140°C et 180°C. Il est dopé dans la masse pour favoriser l'expansion et l'enrobage des éléments humides.

Le dopage permettra, au moment du contact entre l'eau et le bitume toujours chaud, la

création de l'expansion et évitera le déplacement par l'eau du bitume déjà fixé aux gravillons.

4. On procède à l'enrobage à chaud des gravillons par la totalité du bitume du mélange final. L'enrobage à chaud conduit à un très bon mouillage des gravillons par le bitume et un bon enrobage des éléments les plus grossiers. Le film de bitume épais et chaud est bien accroché et réparti autour des gravillons portés à une température voisine.
5. L'ajout du sable humide, à une température ambiante, conduit à l'enrobage complet du mélange :

- expansion spontanée du bitume,
 - enrobage du sable par la mousse de bitume,
 - réchauffage du sable par contact,
 - obtention d'un mélange homogène,
 - un ajout d'eau préalable corrige, si nécessaire, l'humidité du sable, avant de l'introduire dans le malaxeur.
 - l'échange thermique permanent qui intervient au cours des différentes phases du mélange, aboutit à la condensation du reliquat d'eau qui se disperse en partie dans la masse de bitume et assure la maniabilité finale du mélange. On obtient une température de l'enrobé inférieure à 100 °C.
6. Un ajout d'eau supplémentaire peut aussi intervenir en fin de malaxage afin de corriger la maniabilité du mélange. L'eau a deux effets : elle se combine au film de bitume sous forme de fines gouttelettes et elle évite la prise en masse de la température.

II. CARACTERISTIQUES DES EBE

La technique EBE permet de fabriquer et de mettre en œuvre des mélanges ayant les mêmes propriétés que les enrobés à chaud.

A 70 °C, les EBE ont l'aspect et les caractéristiques des enrobés à chaud.

- Ils utilisent les mêmes grades de bitume, au même dosage.
- ils concernent l'ensemble de la gamme des enrobés à chaud, de la grave-bitume(GB) au béton bitumineux.
- la teneur en liant n'a pas de limitation, contrairement aux mélanges à base de mousse de bitume.
- les mélanges, à la fin de leur mise en œuvre, possèdent des performances mécaniques proches des valeurs définitives comme les mélanges à chaud au même stade de maturation.
- la teneur en eau résiduelle des mélanges est inférieure, mais proche de 0,5%.

La technique peut s'appliquer au recyclage des enrobés par le remplacement partiel ou total de la partie froide sableuse contenant les fines, par le recyclat froid.

Elle réduit sensiblement les nuisances affectant l'environnement et la sécurité du personnel d'exécution :

- température de mélange inférieure à 100 °C(60 °C-90 °C)
- énergie calorifique nécessaire à la fabrication, réduite de plus de moitié (sans faire appel à un liant de type émulsion ou à base de solvants) ;
- réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) ;
- réduction des émissions de composés organiques volatils (COV).

III. FORMULATION, FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE

Les méthodes de formulation en laboratoire des enrobés à chaud s'appliquent à la formulation des mélanges EBE.

Les procédures de laboratoire doivent être ajustées à la température des mélanges issus du procédé. Les températures de fabrication des éprouvettes sont comprises entre 60°C et 80°C. Elles permettent, cependant, de réaliser les mêmes types d'essais que pour les enrobés à chaud.

Les températures des essais de comportement des normes NF P 98-130 et NF P 98-138 doivent être respectées.

Le procédé fonctionne avec les grades des bitumes utilisés couramment en construction routière, 35/50 et 50/70, mais aussi avec des bitumes polymères ou des liants plus durs tels que du 10/20.

Des mélanges type béton bitumineux semi-grenu (BBSG) et GB de classe 3, fabriqués selon la technique EBE, permettent d'atteindre les mêmes niveaux de performance que s'ils l'avaient été par enrobage à chaud (tableaux ci-dessous)¹.

Les performances sont atteintes avec une température de fabrication de 80°C. La teneur en eau résiduelle des EBE, après refroidissement, est toujours inférieure à 0,5%.

Formulation d'un BBSG 0/10		
La Noubleau	6/10	43,5 %
La Noubleau	2/6	23 %
La Noubleau	0/2	31,5%
Fines		2 %
Bitume	35/50	5,5%
PCG	60 girations	11,5%
Orniérage	30 000 cycles	6,2 %
Duriez	Compacité	91,6 %
	R 10 ⁵ Pa	71,9
	r 10 ⁵ Pa	68
	r/R	0,95

Exemple de formulation de BBSG/EBE

Formulation d'un GB3 0/10		
La Noubleau	6/10+10/14	44 %
La Noubleau	2/6	21 %
La Noubleau	0/2	33,5%

¹ RGRA N°831 septembre 2004

Fines calcaires		1,5 %
Bitume	35/50	4,5%
PCG	100 girations	10,1%
Orniérage	60 000 cycles	5,4 %
MAER	Module Mpa	7800
Duriez	Compacité	91,9
	R 10 ⁵ Pa	105,9 %
	r10 ⁵ Pa	64,9
	r/R	0,61

Exemple de formulation GB3/EBE

Les performances mécaniques auxquelles doivent répondre les BBSG 0/10 sont (NF P 98-130) :

La Noubleau	6/10	≤ 65 %
La Noubleau	2/6	≤ 46 %
La Noubleau	0/2	≤ 21%
Bitume	35/50	3,5%
PCG	60 girations	≤10%
Duriez	Compacité	≥ 90 %
	R 10 ⁵ Pa	≥ 70 %
	r 10 ⁵ Pa	68
	r/R	≥0,75

Les performances mécaniques auxquelles doivent répondre les GB3 sont (NF P 98-138) :

Bitume	35/50	3,5%
PCG	60 girations	≤10%
Duriez	Compacité	

		$\geq 90 \%$
	$R \cdot 10^5 \text{ Pa}$	$\geq 70 \%$
	$r \cdot 10^5 \text{ Pa}$	68
	r/R	$\geq 0,75$

IV. LES AVANTAGES ENERGITIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES EBE :

1 - Bilan thermique comparatif des enrobés chauds et tièdes

Seule l'énergie nécessaire à la mise en température des composants est prise en compte dans ce qui suit.

1.1 - *Rappel*

- **Chaleur massique c:**

-Corps de masse m, qui élève sa température de θ_1 à θ_2 ; la quantité de chaleur nécessaire est :

$$Q = m \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) \text{ (chaleur sensible)}$$

-**c chaleur massique**, en J /kg(°C) (appelée aussi capacité thermique massique).

$$c_{\text{eau}} = 4,180 \text{KJ/kg}$$

- **Chaleur latente L:**

- C'est la chaleur qu'il faut fournir à la masse unité du corps étudié (ou qu'elle cède) pour changer d'état (à température constante).

- Pour un corps de masse m :

$$Q = m \cdot L \text{ (chaleur latente)}$$

Pour l'eau, la chaleur latente d'évaporation (L_v)est égale à 535cal/g.

$$L_v = 535 \text{cal/g} = 2255 \text{kJ/kg}$$

1.2 - *Bilan thermique enrobé à chaud*

Hypothèses

- Formule granulométrique comprenant 65% de 2/D et 35 % de 0/2
- teneur en eau des gravillons : 1%,
- teneur en eau du sable : 4%
- chauffage des granulats à 150 °C,
- bitume 5,6% à 170 °C,
- température ambiante : 10 °C.

Calcul :

○ **Pour 1000Kg de gravillons secs :**

- énergie de chauffage de gravillons

$$C_{\text{gran}} \times 1000 \text{ kg} \times (150^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 117\,800,00 \text{ kJ}$$

- énergie de chauffage de l'eau

$$C_{\text{eau}} \times (1000/990-1) \times (100^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 3804,55 \text{ kJ}$$

- énergie d'évaporation de l'eau

$$L_v \times (1000/990-1) \times 1000 = 22\,785,60 \text{ kJ}$$

- énergie de chauffage de la vapeur d'eau

$$C_{\text{vap}} \times (1000/990-1) \times 1000 \times (150^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) = 924,24 \text{ kJ}$$

$$\text{Total} = 144\,694,39 \text{ kJ}$$

○ **Pour 1000 Kg de sable sec :**

- énergie de chauffage du sable

$$C_{\text{gran}} \times 1000 \text{ kg} \times (150^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 117\,800,00 \text{ kJ}$$

- énergie de chauffage de l'eau

$$C_{\text{eau}} \times (1000/960-1) \times 1000 \times (100^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 15\,693,75 \text{ kJ}$$

- énergie d'évaporation de l'eau

$$L_v \times (1000/960-1) \times 1000 = 94\,000 \text{ kJ}$$

- énergie de chauffage de la vapeur d'eau

$$C_{\text{vap}} \times (1000/960-1) \times 1000 \times (150^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) = 3812,50 \text{ kJ}$$

$$\text{Total} = 230\,686,25 \text{ KJ}$$

○ **Pour 1000Kg de mélange sec suivant la formule ci-dessus :**

- gravillons : $65\% \times 144\,694,39 \text{ kJ} = 94\,051,35 \text{ kJ}$
- sable : $35\% \times 230\,686,25 \text{ KJ} = 80\,740,19 \text{ KJ}$

$$\text{Total enrobé à chaud} = 175 \text{ Mj}$$

1.9 - Bilan thermique EBE

Hypothèses

- Formule granulométrique comprenant 65% de 2/D et 35 % de 0/2
- teneur en eau des gravillons : 1%,
- teneur en eau du sable : 4%
- chauffage des granulats à 130°C ,

- bitume 5,6% à 170 °C,
- température ambiante : 10 °C.

Calcul :

- **Pour 1000Kg de gravillons secs :**
 - énergie de chauffage de gravillons
 $C_{\text{gran}} \times 1000\text{Kg} \times (130\text{ °C} - 10\text{ °C}) = 100\,440\text{ Kj}$
 - énergie de chauffage de l'eau
 $C_{\text{eau}} \times (1000/990 - 1) \times (100\text{ °C} - 10\text{ °C}) = 3804,55\text{Kj}$
 - énergie d'évaporation de l'eau
 $L_v \times (1000/990 - 1) \times 1000 = 22\,785,60\text{Kj}$
 - énergie de chauffage de la vapeur d'eau
 $C_{\text{vap}} \times (1000/990 - 1) \times 1000 \times (130\text{ °C} - 100\text{ °C}) = 554,54\text{Kj}$
- **Pour 1000Kg de mélange sec suivant la formule ci-dessus :**
 - gravillons : $65\% \times 127\,584,69\text{kj} = 82\,930,05\text{ kj}$

Total EBE 83 Mj

1.3 - Conclusion

- Pour un enrobé à chaud : 175 Mj/t pour le chauffage
- Pour un EBE : 83 Mj/t pour sécher et chauffer
- L'énergie de chauffage, à la tonne d'EBE, est réduite de plus de 50%.
- Il faut noter que l'énergie nécessaire au fonctionnement mécanique d'une centrale d'enrobage à chaud est de l'ordre de 100Mj/t. La consommation sera sensiblement plus faible pour une centrale dédiée aux EBE.

2- Bilan environnemental du procédé

Les émissions de GES sont liées aux combustibles consommés par le chauffage, elles sont réduites de 50 % à la tonne d'EBE.

Les émissions de COV proviennent des fumées de bitume. Parmi celles-ci, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), présents en faible quantité, ont un impact essentiel sur la santé.

Les émissions de HAP sont proportionnelles à la température de fabrication des enrobés. Une réduction de ces émissions, d'un facteur deux. Le fait de réduire de plus de 50 °C la température de mise en œuvre des EBE réduit dans des proportions considérables les risques sur la santé.

V. LES SPECIFITES DU MATERIEL DE FABRICATION DES EBE

Le sécheur et le dépoussiéreur sont dimensionnés pour le séchage et le chauffage à température modérée des seuls gravillons (teneur en eau maximale de 2,5% et absence d'éléments fins). Il en résulte des dimensions beaucoup plus faibles, du fait des quantités réduites de gaz à traiter. La moindre consommation d'énergie thermique facilite la diminution du débit de gaz et les dimensions de l'ossature de filtre.

Le procédé EBE peut s'appliquer à des principes de mélange discontinu ou continu, en veillant à respecter un bon contact entre les constituants, qui favorisent les échanges thermiques, tout au long de malaxage.

Le procédé EBE permet de :

- Concevoir des centrales nouvelles spécialement adaptées à la fabrication des mélanges EBE.
- Concevoir des Kits adaptables aux centrales existantes, pour fabriquer ces mêmes mélanges.
- Assurer une plus grande mobilité aux équipements déplaçables.

CONCLUSION

Le procédé EBE s'inscrit comme une réponse aux besoins exprimés, aujourd'hui, à l'échelle de notre planète, en matière de réduction de consommation d'énergie et de sauvegarde de l'environnement, sans générer un surcoût qui serait prohibitif à sa diffusion. Il améliore, en outre, non seulement la sécurité et les conditions de travail du personnel mais aussi la sécurité des usagers circulant aux abords de chantiers (suppression des risques de brouillard par temps de pluie ou travaux dans les tunnels). Il intéresse les pays en voie de développement, car il permet de concevoir des dispositifs de fabrication moins complexes, consommant moins d'énergie tout en sauvegardant le niveau de performance des mélanges.

Nul doute que les fabricants d'équipement sauront élaborer du matériel capable d'exploiter efficacement un tel procédé.