

Congrès National de la Route 2010

Thème 3 :Techniques innovantes et développement Durable

Expérience Marocaine dans l'utilisation des enrobés et béton bitumineux à modules élevés (EME & BBME)

Par : Mrs YOUSSEFI TAOUFIQ / ADM
EL OTMANI KARIM /LPEE

Résumé : L'objet de la communication est de présenter l'expérience marocaine dans l'utilisation des enrobés à hautes performances – cas de renforcement es des axes d'autoroutes à fort trafic.

Sommaire

I-Choix de nouveau types d'enrobés plus performants .

II-Caractéristiques des enrobés à hautes performances.

III- Etudes au laboratoire

IV- Expérience du renforcement de l'axe d'autoroute kénitra-sidi yamani

V- Retour d'Expérience au Maroc et Recommandations.

I- CHOIX DE NOUVEAU TYPES D'ENROBES PLUS PERFORMANTS

Les renforcements des structures de la chaussée d'autoroute se faisaient généralement avec le BBSG et éventuellement le BBTM lorsque l'état de la chaussée le permet. Ces choix de renforcement ont montré beaucoup de limites. En effet, sur le plan de durabilité, les renforcements déjà réalisés se sont révélés incompatibles avec la durée de vie prévue, notamment sur l'axe Rabat-Kénitra où l'agressivité des poids lourds se répercute négativement sur l'état de la chaussée. De même sur l'axe Rabat-Fès le problème d'orniérage s'est accentué sur les sections à fortes pentes.

Ainsi, pour faire face à ce genre de dégradations prématurées, les paramètres des études ont été durcis davantage par l'adoption d'un coefficient d'agressivité plus élevé, d'un coefficient de risque beaucoup moins important et l'adoption d'un type d'enrobé moins orniérant en passant à un BBSG de classe 3 au lieu d'un BBSG de classe 2.

Ces choix de paramètres d'entrée des études de renforcement se sont traduits par des solutions de renforcement présentant des épaisseurs importantes ce qui se répercute sur le coût, le délai de réalisation (gêne aux usagers) et surtout à impact négatif sur l'environnement par l'utilisation plus importante de granulats, de bitume et d'énergie.

De ce fait, la recherche de nouvelles solutions de renforcement plus économique et plus durable, et protectrices de l'environnement s'est imposée.

Ainsi, parmi les solutions retenues, celle reposant sur un choix d'enrobés présentant des performances mécaniques supérieures à celles d'un BBSG normal, à savoir des enrobés à Module Elevé. L'adoption de ce type d'enrobé pour l'étude de renforcement des sections d'autoroute entre Kénitra et sidi El yamani a permis de passer d'une couche de 8 cm en BBSG à 6 cm en BBME, soit un gain de 25% en épaisseur.

II-CARACTERISTIQUES DES ENROBES A HAUTES PERFORMANCES :(NF EN 13108-1).

Les enrobés à hautes performances sont définies dans la norme NF EN 13108-1 et les caractéristiques essentielles sont résumées ci-après :

II-1 Types des Enrobés à hautes performances : BBME & EME.

II-1-1 Béton bitumineux à module élevé (BBME) :

IL existe deux types de bétons bitumineux à module élevé :

- Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ;
- Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14) .

Chaque type peut se situer dans trois classes de performances :classe 1,2 et 3.

II-1-2 Enrobé à module élevé (EME) :

On distingue trois types d'enrobés à module élevé :

- Enrobé à Module élevé 0/10 mm (EME 0/10) ;
- Enrobé à Module élevé 0/14 mm (EME 0/14) ;
- Enrobé à Module élevé 0/20 mm (EME 0/20) ;.

Chaque type peut se situer dans deux classes de performances :classe 1 et 2 .

Ces classes de performances sont définies au moyen d'une épreuve de formulation,dont le niveau est fonction de l'utilisation du produit.

II-2 Epaisseurs d'utilisation (NF EN 13108-1 ex NFP 98-140 & 141) :

Les épaisseurs d'utilisation sont mentionnées dans le Tableau 1 ci-après :

Type d'enrobé	EME			BBME	
0/D	0/10	0/14	0/20	0/10	0/14
Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)	6 à 8	7 à 13	9 à 15	5 à 7	6 à 9
Epaisseur minimale en tout point (cm)	5	6	8	4	5

Tableau 1 – Epaisseurs d'utilisation par couche

II-3 Caractéristiques du mélange

II-3-1 Teneur en liant

La teneur en liant est calculée à partir du module de richesse K, de la surface spécifique conventionnelle Σ et d'un coefficient α correcteur de la masse volumique des granulats MVR_g.

Et pour chaque type d'Enrobé , le module de richesse K doit avoir une valeur supérieure ou égale à celle donnée dans le tableau 4 :

Type d'enrobé	BBME		EME 0/10-0/14 ou 0/20	
0/D	0/10	0/14	Classe 1	Classe 2
Kmin	3.5	3.3	2.5	3.4

Tableau 4 – Valeurs du module de richesse.

II-3-2 Epreuve de formulation

L'épreuve de formulation a pour objectif d'établir, pour une composition donnée, les caractéristiques de l'enrobé :

- pourcentage de vides ;
- tenue à l'eau ;
- performances mécaniques si nécessaire : orniérage, fatigue et module.

Quatre niveaux d'épreuve de formulation sont définis :

- niveau 1 : essai PCG (NF P 98-252) ;essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) ;
- niveau 2 : essai PCG (NF P 98-252) ;essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) ;essai d'orniérage (NF P 98 -253-1)
- niveau 3 : essai PCG (NF P 98-252) ;essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) ;essai d'orniérage (NF P 98 -253-1)
essai de caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe (NF P 98-260-2), ou par essai de traction directe (NF P 98-260-1) ;
- niveau 4 : essai PCG (NF P 98-252) ;essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) ;essai d'orniérage (NF P 98 -253-1)
essai de caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe (NF P 98-260-2), ou par essai de traction directe (NF P 98-260-1) ;essai de fatigue (NF P 98-261-1).

À chaque niveau, dans le cadre d'exigences particulières, d'autres essais de laboratoires que ceux prévus pour ce niveau peuvent être demandés.

La production des résultats des essais de l'épreuve de niveau 1 est obligatoire dans tous les cas ainsi que la mesure du module de rigidité. Le niveau d'épreuve de formulation est spécifié en fonction des objectifs recherchés, de l'enjeu du chantier, de son volume et de l'importance des diverses sollicitations auxquelles sera soumis l'enrobé.

II-3-3 Performances en laboratoire

Les performances en laboratoire sont mesurées à l'aide des essais définis par le niveau d'épreuve de formulation retenu et éventuellement des autres essais demandés dans le cadre d'exigences particulières.

Les résultats doivent respecter les valeurs figurant dans les Tableaux 5 ; 6 et 6 bis .

Essai	BBME		Essai	EME	
	0/10	0/14		Classe 1	Classe 2
	Min-max	Min-max			
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NFP 98-252) *- à 10 girations *- à 60 girations *- à 80 girations	11- 5-10 -	11- - 4-9	Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NFP 98-252) *- à 80 girations pour EME 0/10 *-à 100 girations pour EME 0/14 *- à 120 girations pour EME 0/20	≤10	≤6

Tableau 5 – Pourcentages de vides à respecter.

Essai sur BBME 0/10 ou 0/14	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) r (en MPa) après immersion / R (en MPa) à sec	≥ 0,80	≥ 0,80	≥ 0,80
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30 000 cycles et à 60 °C, à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %	≤ 10 %	≤ 7,5 %	≤ 5 %
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) Module, en mégapascals, à 15 °C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %	≥ 9 000	≥ 12 000	≥ 12 000
Essai de traction directe (NF P 98-260-1) Détermination du module et de la perte de linéarité à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 % Module, en mégapascals, à 15 °C, 0,02 s.	≥ 9 000	≥ 12 000	≥ 12 000
Essai de fatigue (NF P 98-261-1) Déformation relative à 10 ⁶ cycles, 10 °C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %, ε ₆	≥ 110 μdef	≥ 100 μdef	≥ 100 μdef

Tableau 6 – Performances mécaniques.

Essai sur EME 0/10 -10/14 ou 0/20	Classe 1	Classe 2
Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) r (en MPa) après immersion / R (en MPa) à sec	≥ 0,70	≥ 0,75
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'orniérage en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30 000 cycles et à 60 °C, à un pourcentage de vides compris entre -7 % et 10 % (classe 1) -3% et 6 % (classe 2)	≤ 7.5 % -	– ≤ 7,5 %
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) Module, en mégapascals, à 15 °C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre -7 % et 10 % (classe 1) -3 % et 6 % (classe 2)	≥ 14 000 -	– ≥ 14 000
Essai de traction directe (NF P 98-260-1) Détermination du module et de la perte de linéarité à un pourcentage de vides compris entre -7 % et 10 % (classe 1) -3% et 6% (classe 2) Module, en mégapascals, à 15 °C, 0,02 s.	≥ 14 000 -	– ≥ 14 000
Essai de fatigue (NF P 98-261-1) Déformation relative à 10 ⁶ cycles, 10 °C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre -7 % et 10 % (classe 1) -3 % et 6 % (classe 2)	≥ 100 µdef -	– ≥ 130 µdef

Tableau 6bis – Performances mécaniques.

II-4 Mise en œuvre :

Les conditions de mise en œuvre sont définies par la norme NF P 98-150 sous réserve des dispositions ci-après.

II-4-1 Travaux préparatoires

Le respect des conditions d'emploi fixées ci-dessus peut nécessiter un reprofilage préalable, conformément à la norme NF P 98-150.

II-4-2 Application

II-4-2-1 Couche d'accrochage

L'application du BBME et EME est précédée d'une couche d'accrochage ou de tout dispositif assurant la liaison des couches. La couche d'accrochage doit comporter au moins 250 g de bitume résiduel par mètre carré, elle est répandue de façon continue à l'aide d'un dispositif mécanique de répandage.

II-4-2-2 Température de répandage

Pour les BBME et EME au bitume pur, la température à l'application doit être supérieure à 140 °C derrière le finisseur.

II-5 Performances in situ

II-5-1 Pourcentages de vides

Le pourcentage de vides moyen obtenu sur la planche de référence ou de vérification réalisée selon les normes NF P 98-150 et XP P 98-151 doit être :

Pour le BBME : compris entre 4 % et 8 %.

Pour l'EME, il doit respecter les valeurs spécifiées dans le tableau 7 à savoir :

EME Type 0/10-0/14 ou 0/20 de classe 1	EME Type 0/10-0/14 ou 0/20 de classe 2
≤ 10 %	≤ 6 %

Tableau 7 – Pourcentage de vides.

II-5 -2 Macrotecture

La Hauteur au Sable Vraie (norme NF P 98-216-1) mesurée après mise en oeuvre en couche de roulement conformément à la norme NF P 98-150, doit être supérieure ou égale à celle indiquée dans le Tableau 8, pour 90 % des points contrôlés.

Essai	BBME 0/10	BBME 0/14
Hauteur au sable vraie NFP 98-216-1	0.4 mm	0.5 mm

Tableau 8 – Hauteur au sable vraie HSv.

III-Etudes au laboratoire :

L'étude de formulation est menée comme pour les enrobés classiques avec en plus une caractérisation des performances mécaniques supplémentaires exigées. La formulation comprend donc obligatoirement :

- *-Une étude de résistance à l'orniérage.
- *-Une étude de résistance à la fatigue.
- *-Une étude de module de rigidité.

Les principes des essais de laboratoire sont décrit ci-après :

III-1 ORNIERAGE : NFP 98-253-1.

III-1-a Principe de l'essai d'orniérage :

Le passage répété d'une roue équipée d'un pneumatique, soumettant une éprouvette parallélépipédique de matériau hydrocarboné à une charge verticale, provoque une diminution relative de l'épaisseur appelée ornière. L'éprouvette est placée dans un moule et est testée dans des conditions isothermes, la surface de l'éprouvette affleurant la partie supérieure du moule. La charge verticale est maintenue quasi-constante par un dispositif approprié. Le pneumatique est animé suivant le grand axe de l'éprouvette d'un mouvement sinusoïdal de fréquence et d'amplitude spécifiées.

III-2 Module de Rigidité : NF EN 12697 ex NFP 98-260-2.

III-2-a Principe de l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales :

Cette méthode de mesure du module de rigidité des mélanges hydrocarbonés au moyen d'un essai de flexion en tête sur une éprouvette console. Une force sinusoïdale, $F = F_0 \times \sin(\omega \times t)$, ou une déflexion sinusoïdale, $z = z_0 \times \sin(\omega \times t)$, est appliquée en tête d'une éprouvette collée à sa base à un support fixé sur un châssis rigide. Il est recommandé que la force, F_0 , ou la déflexion, z_0 , soit telle qu'elle provoque une déformation $\varepsilon \leq 50 \times 10^{-6}$ dans la partie soumise à la contrainte la plus forte et dans un domaine supposé linéaire pour le mélange hydrocarboné. Le module complexe est calculé à des températures et à des fréquences variées en fonction de F_0 , z_0 et l'angle de phase, Φ .

III-3 Résistance à la Fatigue : NF EN 12697-24 ex NFP 98-261-1.

III-3-a Principe de l'essai de flexion en deux points sur éprouvettes trapézoïdales:

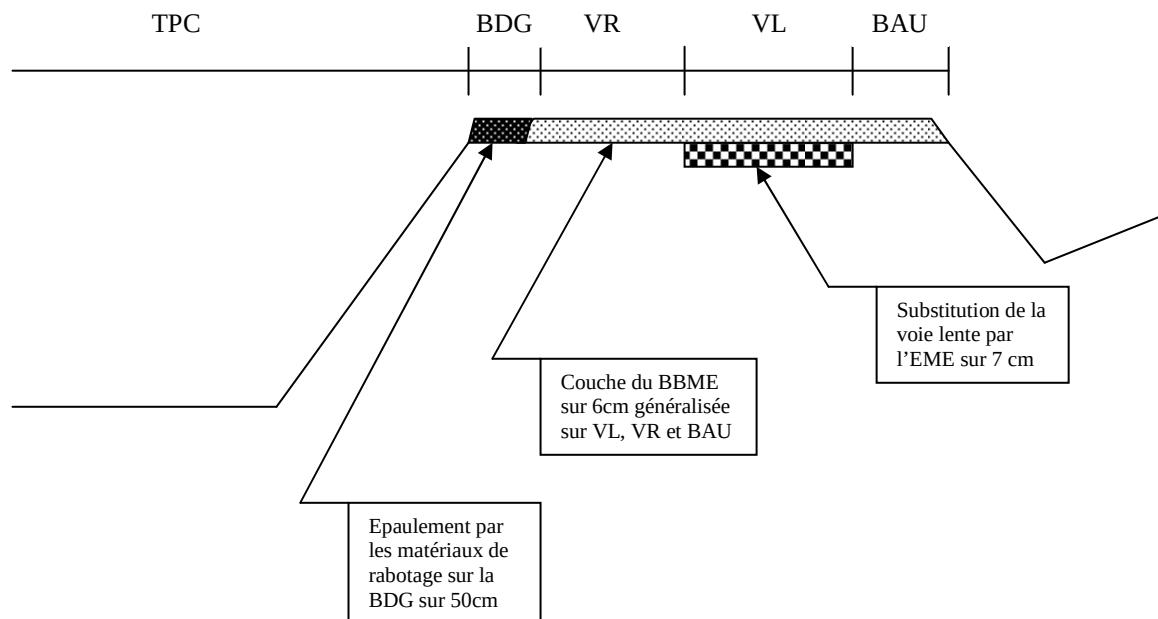
Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement à déplacement imposé par flexion en deux points, en utilisant des éprouvettes de forme trapézoïdale. La méthode peut être utilisée pour des mélanges bitumineux d'une dimension des granulats maximale de 20 mm, sur des éprouvettes préparées en laboratoire ou provenant de chaussées d'une épaisseur d'au moins 40 mm. Pour les mélanges d'une dimension supérieure D , allant de 20 mm à 40 mm, l'essai peut être réalisé en utilisant le même principe, mais avec des éprouvettes de taille adaptée. Pour une fréquence donnée de déplacement sinusoïdal, la méthode doit être appliquée à plusieurs éprouvettes soumises à essai en atmosphère ventilée et à température régulée.

IV- EXPERIENCE DE RENFORCEMENT DE L'AUTOROUTE KENITRA-SIDI EL YAMANI

Suite à l'étude de renforcement de la chaussée entre Kénitra et Sidi El Yamani, réalisée par Scetauroute, un programme pour l'entretien de la chaussée a été établi sur une durée de 3 ans.

Les deux premières parties de ce plan de renforcement ont été réalisées durant les années 2008 et 2009. La troisième est en cours de réalisation et dont l'achèvement est prévu vers la fin de l'année en cours.

Le principe de ce renforcement est résumé dans le schéma qui suit :



a) Renforcement de la structure de la chaussée existante :

Ces travaux concernent principalement les voies lentes de la chaussée dans un état de dégradation avancée ou susceptibles de connaître des dégradation compte tenu de la durée de vie résiduelle établie lors de l'étude.

Ils consistent en la substitution de 7cm de la couche de roulement existante (rabotage de la voie lente sur 3,50ml) par une couche d'un enrobé à Module Elevé EME de classe 2.

b) Rechargement général :

Ces travaux concernent toutes les sections concernées par les travaux et citées ci-dessus.

Ils consistent à recouvrir les deux voies de la circulation et la BAU par un enrobé à module élevé (BBME) de classe 3.

D'une manière succincte , les travaux de renforcement des sections concernées se résument comme suit :

Section	Nature	Sections en voie lente	Nature
95+000/141+000	06 BBME 0/14 Classe 3	139+000/137+200 135+800/134+100 127+400/121+800 117+400/112+100	07 EME 0/14 Classe 2
41+000/61+000		Sections ponctuelles déterminées par le maitre d'oeuvre	
141+000/159+000			

Lors des campagnes de renforcement de 2008 et 2009, l'entreprise en charge des travaux avait proposé les formulations suivantes :

POUR L'EME 0/14 :

L'EME est un 0/14 de classe 2 dont les caractéristiques exigées ainsi que celles de l'étude de formulation sont récapitulées dans le tableau ci-après :

La formulation est composée des fractions suivantes :

45 % Sable 0/4 + 15% Gravette 4/6+ 20% Gravette 6/10 + 20% Gravette 10 /14+ 5,8% Bitume 20/30

Essai	Exigence	Valeurs obtenues
Essai de compactage PCG <i>% à 100 girations</i>	≤ 6	2%
Essai Duriez à 18 C° <i>Rh/Rs</i>	$\geq 0,75$	0,82%
Essai d'orniérage <i>Profondeur d'ornière/à l'épaisseur dalle (%)</i>	$\leq 7,5\%$	3,25%
Essai de fatigue <i>Déformation relative</i>	$\geq 130.10^{-6}$	160.10 ⁻⁶
Essai Module complexe	$\geq 14.000 \text{ MPa}$	14 910 MPa

POUR LE BBME 0/14 :

Le BBME est un 0/14 de classe 3 dont les caractéristiques exigées ainsi que celles de l'étude de formulation sont récapitulées dans le tableau ci-après :

La formulation est composée des fractions suivantes :

45 % Sable 0/4 + 25% Gravette 4/10+ 30% Gravette 10/14 + 5,6% Bitume 20/30

Essai	Exigence	Valeurs obtenues
Essai de compactage PCG <i>% vides à 10 girations</i> <i>% vides à 80 girations</i>	$\geq 11\%$ $4\% \leq - \leq 9\%$	16,9% 8,7%
Essai Duriez <i>Rh/Rs</i>	$\geq 0,80$	0,85
Essai à l'orniéreur <i>Profondeur ornière/à l'épaisseur de la dalle (%)</i>	$\leq 5\%$	1,97%
Essai de fatigue <i>Déformation relative</i>	$\geq 100.10^{-6}$	120.10 ⁻⁶
Essai Module complexe	$\geq 12\,000\text{ MPa}$	17 758 MPa

Le bilan de ces deux campagnes de renforcement en terme de qualité des travaux et respect des exigences est récapitulé comme suit :

IV.1- RAPPEL DES RESULTATS DE CONTROLE DES TRAVAUX :**1- GRANULATS POUR ENROBES A CHAUD (EME 0/14 ET BBME 0/14)**

- Les granulats utilisés pour la fabrication de l'enrobé à module élevé (EME 0/14) sont de nature calcaire gris bleu de la région de skhirate.
- Les granulats utilisés pour la fabrication du béton bitumineux à module élevé (BBME 0/14) sont d'origine alluvionnaire de l'oued Quergha de la région d'Ouezane.

Les matériaux identifiés présentent des caractéristiques satisfaisantes vis-à-vis des spécifications du CCTP sauf pour le gravillon 4/10 qui a présenté une propreté légèrement faible (0,8 à 1,4% au lieu d'inférieur à 1%) et des passants à 6,3 mm parfois en dessous de 34%. Le coefficient d'écoulement du sable est de 36 s, ce qui est acceptable vu les résultats d'orniérage. Le 10/14 a été parfois de classe 8/14.

2- BITUMES PUR 20/30

Les échantillons de bitumes purs prélevés au niveau du poste d'enrobage ont fait ressortir des pénétrabilités en général de 21 à 30 (1/10 mm) et des points de ramollissement en général de 55 à 56 °C ; avec des augmentations de TBA après RTFOT de 5°C et des PENE résiduelles de 58,5% .

3- EMULSIONS

Les résultats des analyses réalisées sur des échantillons d'émulsion utilisées en couche d'accrochage sont présentés en annexe, et montrent que les liants identifiés présentent en dehors du dosage en eau (légèrement élevé parfois) des caractéristiques satisfaisantes pour une émulsion cationique à rupture rapide de classe R65. Ce surdosage en eau affectera surtout le dosage en bitume résiduel de la couche d'accrochage, mais les résultats des campagnes de carottage ont fait ressortir un collage concluant entre couches.

4- CAROTTAGE ET MESURE DES EPAISSEURS

Les résultats des campagnes de carottage réalisées au niveau des deux couches mettent bien en évidence l'existence d'un bon collage.

5- RUGOSITE DU BBME

Les résultats obtenus sont satisfaisants (Moyenne supérieure à 0,60 mm et Minimum des valeurs est de 0,40 mm)

6- UNI DU BBME

L'uni est généralement satisfaisant.

V- RETOUR D'EXPERIENCE AU MAROC ET RECOMMANDATIONS :

La décision de construire ou de rénover une route et/ou une autoroute est liée bien souvent à un ensemble de facteurs technico-économiques qui porteront, d'une part sur le coût de l'investissement, d'autre part sur son coût d'usage et d'entretien dans le temps. Aussi, le choix des matériaux de structure revêt une grande importance. Au Maroc et en faveur du développement durable, a choisi de passer aux méthodes alternatives en ce qui concerne l'utilisation des enrobés à hautes performances à savoir « Enrobés à Module Elevé :EME & Béton Bitumineux à Module Elevé : BBME ».

L'adoption de ces enrobés au niveau des axes autoroutiers les plus sollicités et plus particulièrement l'axe Kenitra –Sidi Yamani a permis de conclure ce qui suit :

a-En surface :

- *-Une bonne résistance à l'orniérage ;
- *-Pas de problèmes de fissuration thermique.

b-En structure :

- *-De bonnes performances mécaniques permettent de réduire sensiblement les épaisseurs, de l'ordre de 20 à 25 % , d'où un intérêt économique non négligeable;
- *-Un apport structurel important avec un changement des habitudes en matière de teneur en liant des couches .
- *-Des chantiers performants et économiques !

Néanmoins , il faut prendre en considération quelques précautions d'emploi à savoir :

Avoir un support peu déformable ;Veiller au strict respect des épaisseurs et faire la vérification des performances avec les matériaux du chantier.