

### III.1.INTRODUCTION

Dans les années 80, les travaux de renforcement en travers d'agglomération et de restructuration de voie lente d'autoroutes ont conduit à développer des matériaux bitumineux d'assise aux performances mécaniques plus élevées (module et fatigue), permettant d'en réduire l'épaisseur : Les enrobés à module élevé (EME) étaient nés. [43].

Les enrobés à modules élevés concernèrent les assises de chaussées (base-fondation) et les couches de liaison. Ils apportent une plus grande résistance à la fatigue que les bases asphaltiques conventionnelles, avec une rigidité analogue importante[9].

Le principe des EME repose sur deux idées pour augmenter notablement le module de rigidité et une meilleure tenue à la fatigue :

- Le remplacement du bitume classique par un bitume dur 20/30 ou hyper dur10/20.
- Par addition de produits industriels, comme le polyéthylène, les fibres cellulosiques, fibres de verre, fibres de roche, bitume additionné de glisonite (Asphalte naturel très dur)

Ces mélanges en France sont prescrits dans la Norme NF P 98-140. La norme définit les mélanges du module élevé fabriqués à chaud dans la centrale et destinés à une utilisation dans la construction des couches de fondation de la chaussée, Elle établit les caractéristiques que doivent avoir les essais à effectuer et les conditions pour leur fabrication. On distingue trois types de mélanges selon la classe maximale de l'agrégat, qui sont les suivantes:

1. Enrobé à module élevé 0/10mm. (EME 0/10).
2. Enrobé à module élevé 0/14 mm. (EME 0/14).
3. Enrobé à module élevé 0/20 mm. (EME 0/20). [13].

### III.2.Historique des EME

Les premiers graves bitumes (GB) sont apparues au milieu des années 1960 pour répondre à un accroissement du trafic poids lourd. Elles étaient fabriquées par mélange à chaud à faible teneur en bitume (de 3 à 3,5% pour les couches de base et seulement de 1,5 à 2,2% en couche de fondation). Les bitumes étaient assez durs pour l'époque avec des grades 40/50 ou 60/70 et les compositions granulométriques faisaient appel à 2 ou 3 coupures (0/4, 4/10 et 10/20). Concernant les teneurs en fines, celles-ci étaient faibles et généralement comprises entre 3 et 7%. [42]

A partir de la fin des années 1970, pour limiter le phénomène de désenrobage des GB, les teneurs en bitume ont été augmentées pour atteindre des valeurs de 4,5 à 5% pour les GB les plus performantes.

Malgré ces modifications, le problème des graves bitumes réside dans l'importance des épaisseurs à mettre en œuvre pour obtenir des performances mécaniques de plus en plus grandissantes. Ainsi, ces considérations économiques mêlées à un souci de préservation des ressources naturelles ont conduit à la mise au point d'une nouvelle technique pour l'assise des chaussées, les EME. Ceux-ci permettent de réduire les épaisseurs de matériaux avec des performances mécaniques élevées, s'inscrivant dans une politique de développement durable. Pour atteindre cet objectif, les modifications se sont portées sur les squelettes granulaires (plus stables via l'utilisation de granulats et de sables concassés), l'emploi de bitume plus dur et sur les teneurs en liant plus élevées que pour les GB.

### **III.3.Caractéristiques des EME**

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps présenter l'épreuve de formulation comprenant les différents essais et exigences à atteindre en fonction du type d'enrobé. Ensuite, nous résumerons les principales caractéristiques concernant les EME.

#### **1-Les différents niveaux de l'épreuve de formulation [14][30] [42]**

Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée, de la taille de chantier et des enjeux. La plupart des enrobés nécessitent à minima une étude de niveau 2 exceptés les EME que la norme 13108-1 oriente vers une étude de niveau 4. Les différents essais présentés au chapitre II permettent de vérifier les caractéristiques de l'enrobé formulé vis-à-vis des normes en vigueur.

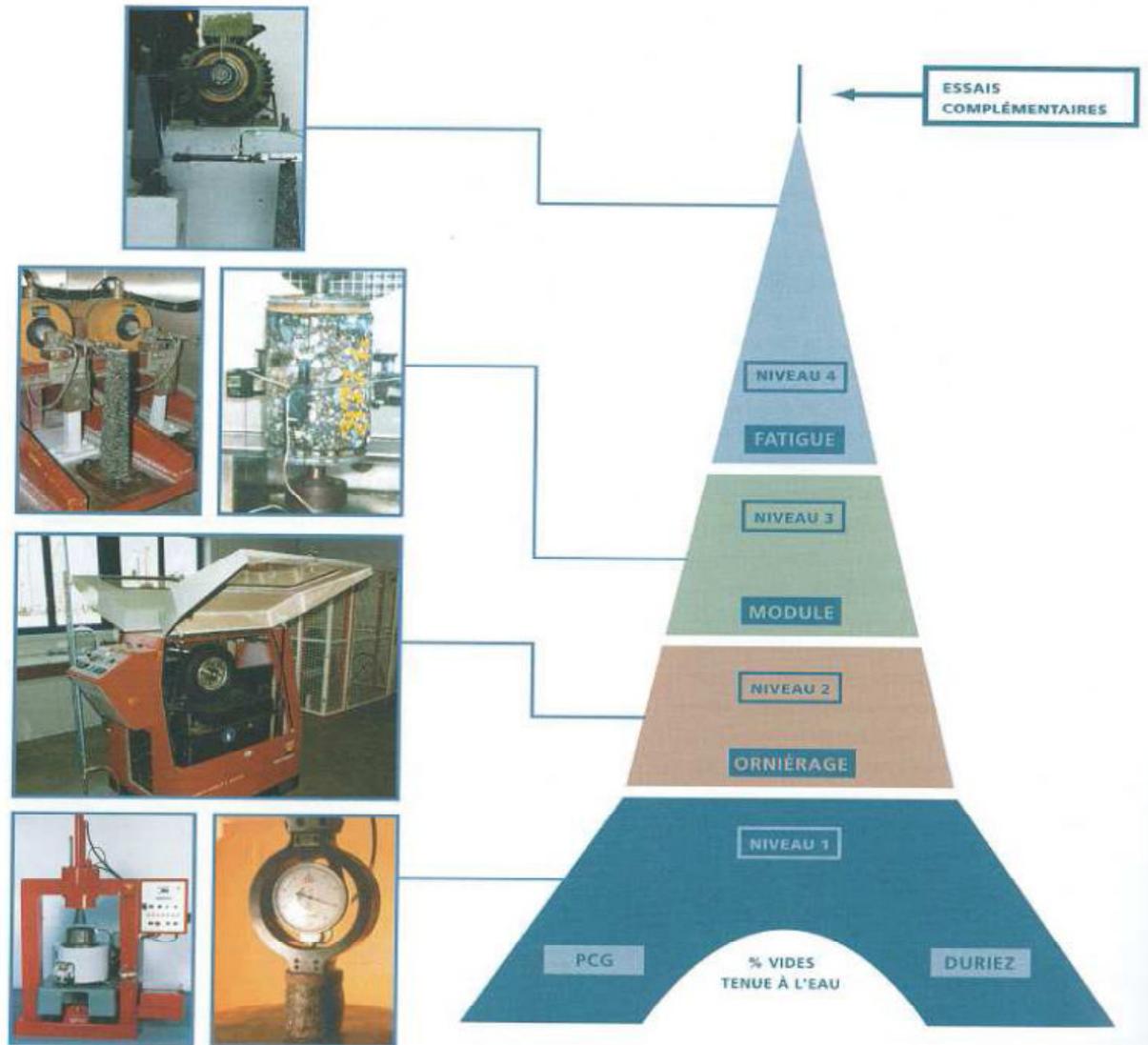


Figure III.1. Niveaux de l'épreuve de formulation

Nous présentons les différents niveaux sans toutefois entrer dans le détail de l'exécution des différents essais. Ainsi, seuls les essais réalisés dans le cadre de l'évaluation du module seront détaillés ultérieurement.

- Niveau 1 : Ce niveau permet d'estimer le comportement des matériaux vis-à-vis de leur tenue à l'eau (essai Duriez) et vis-à-vis de leur maniabilité (essai Presse à Cisaillement Giratoire).
- Niveau 2 : Ce niveau comporte les essais du niveau 1 auxquels s'ajoute l'essai de résistance à l'orniérage.
- Niveau 3 : Ce niveau comporte les essais des niveaux précédents auxquels s'ajoute un essai de module. Cet essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée (c'est le cas des EME).

Il existe différentes méthodes pour évaluer le module de rigidité d'un enrobé. La procédure de ces différents essais se trouve dans la norme NF EN 12697-26. Parmi les méthodes d'évaluation du module, nous comptons notamment l'essai de module complexe ou l'essai de traction directe MAER (Machine Asservie d'Essais Rhéologiques)

- Niveau 4 : Ce niveau comporte tous les essais cités précédemment ainsi qu'un essai de détermination de la résistance à la fatigue. Le recours à cet essai intervient généralement pour des chantiers importants, notamment sur le réseau autoroutier.

## 2-Différentes classes d'enrobé à module élevé [30]

La norme « enrobé à module élevé » distingue 2 classes d'enrobé à module élevé : les EME classe 1 et les EME classe 2. Le classement d'un enrobé d'assise se fait sur la base de la teneur en liant et sur la base des caractéristiques mécaniques (orniérage, tenue à la fatigue, module) obtenues en laboratoire.

- classe 1 : environ 4,2% de liant dans le mélange (module de richesse supérieur à 2,5).  
Le système normatif définit bien cette classe, cependant cette technique a progressivement disparu au profit des EME de classe 2.
- classe 2 : environ 5,6% de liant dans le mélange (module de richesse supérieur à 3,4)

## III.4.Composition de l'EME :

### 1-Composition du mélange granulaire [15]

Les courbes granulométriques sont généralement continues. Il est possible d'introduire des discontinuités dans la courbe granulométrique [4/6] ou [6/10]. Les discontinuités ont en général peu d'effet sur les caractéristiques du matériau. Si la courbe est assez grenue (passant à 2 mm de l'ordre 28 %), il convient de remonter la teneur en fines à environ 7,7 %.

Le tableau IV.1 présente les courbes granulométriques de départ des graves bitumes et des Enrobés à Module Elevé 0/20 ou 0/14. La norme traitant des EME prévoit également la possibilité de réaliser des EME 0/10, dont la courbe granulométrique de départ est présentée au tableau III.2.

Tableau III.1 – Courbe granulométrique de départ GB et EME 0/20 ou 0/14 [15]

Passant tamis en mm	D = 20 mm ou 14 mm Plage habituelle de variations		
	Mini	Visée	Maxi
6.3	45 (50 pour 0/14)	53	65(70 pour 0/14)
4	40	47	60
2	25	33	38
0,063	5,4	6,7	7,7

Tableau III.2 – Courbe granulométrique de départ EME 0/10 [15]

Passant tamis en mm	D = 10 mm Plage habituelle de variations		
	Mini	Visée	Maxi
6,3	45	55	65
4		52	
2	28	33	38
0,063	6,3	6,7	7,2

## 2-Teneur en bitume

La teneur en bitume pour débiter l'étude est calculée à partir de la surface spécifique du mélange, et du module de richesse minimal de la norme.

Tableau III.3 – Module de richesse de départ EME [30]

EME de type 0/10,0/14ou0/20	CLASSE 1	CLASSE 2
K	$\geq 2.5$	$\geq 3.4$
Dosage en bitume (MVRg=2.65)	$\geq 4.2$ (idem GB3ou 4)	$\geq 5.6$

## III.5. Performances et formulations [6].

Par rapport aux formulations des GB, celles des EME sont plus voisines de celles des enrobés épais pour couche de surface (BBSG) ou des GB de classe 4 (courbe, généralement continue, comportant 30 à 35 % de sable et 7% de fines). Les dimensions maximales sont : 10, 14 et 20 mm, mais ce sont les 0/14 semi-grenu qui sont les plus fréquemment utilisés. Les caractéristiques mécaniques et de fabrication, concernant l'angularité, la propreté par exemple, des gravillons et des sables, sont conformes à celles des GB. Comme pour la formulation des GB, la norme permet d'utiliser des agrégats d'enrobés (matériaux bitumineux à recycler) selon le contexte du chantier avec un maximum de 40 %. La teneur en fines est de 7 à 9 %.

Le liant utilisé est le plus souvent un bitume pur prêt à l'emploi, beaucoup plus rarement un bitume modifié ou un bitume spécial, tels que définis dans la norme NF EN12591, élaborés par les sociétés pétrolières et les entreprises routières. Bien qu'aucune caractéristique des liants ne soit imposée dans la norme, il convient d'utiliser le plus souvent des bitumes 10/20, 15/25 ou 20/30 c'est à dire dont la pénétrabilité à 25° C se place dans

l'intervalle 10 – 30 (1/100 mm) et dont la température Bille-Anneau soit proche de 65° C, ou supérieure.

Une bonne tenue en fatigue (cas des EME Classe 2) est assurée par une teneur en vide faible (de l'ordre < 6 %), et par un film épais de liant autour des granulats, caractérisé par le module de richesse, et assurant une bonne déformabilité favorable à l'auto-réparation.

Le tableau IV.4 présente une comparaison des caractéristiques mécaniques normalisées des matériaux bitumeux d'assises, entre les graves bitumes GB et les enrobés à module élevé EME. On notera qu'il existe une bonne continuité dans les performances mécaniques, entre les classes de GB et d'EME, pour répondre à des choix variés d'utilisation.

Tableau III. 4- Performances mécaniques comparées des EME et GB [6]

ESSAIS	GB de classe 2	GB de classe 3	EME classe 1ou GB de classe 4	EME classe 2
<b>DURIEZ à18°C</b> Rapport r/R	$\geq 0.65$	$\geq 0.70$	$\geq 0.70$	$\geq 0.75$
<b>ORNIERAGE</b> -profondeur d'orniérage en % de l'épaisseur de la dalle (10cm) à60°C, au %de vide compris entre :  8et 11% après 10.000 cycles 7et 10% après 10.000 cycles 5et 8% après 30.000 cycles 7et 10% après 30.000 cycles 3et 06% après 30.000 cycles	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$ (GB4) $\leq 7.5\%$ (EME1)	$\leq 7.5\%$
<b>MODULE COMPEXE</b> Module à 15°C, 10HZ au% de vides complexe entre :  7%et 10% 7%et 10% 5%et 8% 3%et 6%	$\geq 9.000\text{MPa}$	$\geq 9.000\text{MPa}$	$\geq 14.000\text{MPa}$ (EME1) $\geq 11.000\text{MPa}$ (GB 4)	$\geq 14.000$ MPa
<b>FATIGUE</b> Déformation relative $\epsilon_6$ à $10^6$ cycles, 10° C et 25 Hz au % de vides compris entre : 7%et 10% 5%et 8% 3%et 6%	$\geq 80 \times 10^{-6}$	$\geq 90 \times 10^{-6}$	$\geq 100 \times 10^{-6}$ (EME1) $\geq 100 \times 10^{-6}$ (GB4)	$\geq 130 \times 10^{-6}$

### III.6. Dimensionnement –épaisseurs d'utilisation

Les épaisseurs moyennes (en cm) de mise en œuvre ainsi que les épaisseurs minimales en tout point sont mentionnées dans le tableau III.6. Cette technique performante nécessite un très bon respect des épaisseurs, pour un bon fonctionnement structurel.

Tableau III.5 - Epaisseurs d'utilisation par couche[6]

Type d'EME	Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)	Epaisseur minimale en tout point (cm)
EME 0/10	6à8	5
EME 0/14	7à15	6
EME 0/20	9à15	8

### III.7. Domaine d'emploi –précautions d'usage [6]

Le créneau privilégié est celui des travaux neufs et de renforcement fortement sollicités, avec parfois des contraintes de seuil, comme en contexte urbanisé. On peut citer :

- les voies à trafic lourd, canalisé et lent, telles que couloirs de bus,
- les voies spécifiques à trafic très lourd : voie spéciale poids lourds, quai de chargement, piste d'évolution des engins de manœuvre des portes containers,...
- les renforcements de chaussées en décaissement, voiries urbaines ou périurbaines,
- la réfection et le renforcement de voies lentes d'autoroutes après fraisage limité à 8 ou 12cm d'épaisseur. Une couche de roulement générale, en Béton Bitumineux Très Mince par exemple, est ensuite mise en œuvre sur toute la largeur des voies,
- les pistes et zones de circulation des aéroports, lorsque le trafic est important en nombre de mouvement et surtout en charge supportée par chaque roue des trains d'atterrissage.

Ces EME 2 sont fréquemment utilisés sur les aéroports français. Le service technique de l'aviation civile (STAC) a rédigé une note d'information ainsi qu'un guide pour préciser les coefficients d'équivalence pour le dimensionnement et le domaine d'emploi spécifique des EME (disponible sur le site internet STAC).

Ce matériau EME2, associé à une couche de roulement en béton bitumineux très mince (2 à 3 cm) constitue l'une des techniques d'entretien les plus fréquentes, pour les chaussées à très fort trafic, puisque dans ce cas, du fait d'un pouvoir structurel plus grand, la réduction d'épaisseur peut atteindre 25 %. De plus, la résistance à l'orniérage est excellente et l'on observe un bon maintien des caractéristiques de surface (adhérence, rugosité).

Les principales précautions, concernant la mise en œuvre, doivent être respectées pour permettre un bon comportement de la technique :

1. disposer d'un support de capacité portance suffisante pour assurer une restitution satisfaisante durant le compactage, pour densifier correctement l'EME,
2. les performances mécaniques de l'EME doivent bien entendu, satisfaire les spécifications de la norme, sur notamment la rigidité du matériau,
3. respecter impérativement les épaisseurs moyennes du dimensionnement et surtout limiter les variations d'épaisseur (bon uni du support),
4. assurer une protection superficielle par une couche de surface adaptée au trafic (suivant le principe de dissociation des couches) et au climat notamment hivernal.

Par ailleurs, une attention particulière doit être également accordée à la réalisation des joints transversaux et surtout longitudinaux, pour éviter tout point faible. On choisira si possible des applications en pleine largeur. Pour satisfaire les recommandations, les contrôles porteront sur les points suivant :

- réception de la plateforme par des mesures de rigidité au déflectographe,
- vérification des performances mécaniques lors de l'étude de laboratoire, la norme EME prévoit dans le niveau 1 (minimum pour tout marché) l'essai de module, en plus de l'essai PCG et résistance à la tenue à l'eau
- contrôles des épaisseurs et du collage des couches par carottages ou mesures de la teneur en vides par nucléo densimètre.

### **III.8. Conclusion**

Les EME de classe 2 sont utilisés dans tous types de travaux (travaux neufs, rechargement, réfection, renforcement). Leur comportement à court terme est bon. A plus long terme, il reste globalement dans des limites acceptables. La fissuration d'origine thermique est, dans les conditions actuelles, un phénomène relativement marginal.