

INCIDENCE DU REGLAGE DE LA CENTRALE D'ENROBE SUR LES PERFORMANCES DE L'EME A BASE DE BETON BITUMINEUX RECYCLE DANS LES TRAVAUX D'ENTRETIEN DE LA CHAUSSEE DE L'AUTOROUTE HAD SOUALEM -EL JADIDA

Par : Mr M.AIT EL AAL (LPEE/CEGT). Mme A.SKIKER (LPEE/CEGT). M.ELFADILI/CEGT

Résumé

Le concept de développement durable est un axe politique majeur dans le domaine autoroutier, il constitue un objectif quotidien pour la société des Autoroutes du MAROC dans la réalisation de son programme de construction et d'entretien du réseau autoroutier. Forçant, ainsi tous les intervenants dans la réalisation de ce programme à mettre en œuvre de nouveaux procédés, parmi lesquels, le recyclage des matériaux d'enrobés pour l'entretien des chaussées dans le but d'économiser les matériaux routiers et en particulier le bitume.

Le chantier de renforcement de l'Autoroute de Had Soualem –El jadida représente un exemple de cet effort. En effet, le béton Bitumineux Semi Grenu extrait de l'ancienne chaussée de la voie lente a été réintégré dans la composition du nouvel enrobé EME. Il représente par-là, l'ambition de pérenniser la pratique de valorisation des matériaux à travers leur recyclage et de développer de nouvelles techniques respectueuses de l'environnement, limitant les apports en matériaux (granulats et bitume) et la pollution liée à leur acheminement.

Ce traitement est réalisé moyennant quelques aménagements au niveau de la centrale d'enrobage classiques de type discontinu. Les enrobés à recycler sont introduits dans le cycle de fabrication entre les opérations de séchage des granulats et de malaxage. Dans ce mode de recyclage, le réchauffage des enrobés à recycler s'effectue par contact avec les granulats neufs surchauffés.

A travers cet article nous essayons donc de donner des indications sur les performances et la qualité du produit fini, l'objectif étant de porter un jugement définitif sur le recyclage en centrale des enrobés, de définir le domaine d'emploi du recyclage en centrale et d'apporter quelques précisions nécessaires à la bonne exécution des travaux.

1- INTRODUCTION

Les travaux d'entretien et de réhabilitation des chaussées sont généralement destinés à préserver le capital que représente la route et à maintenir le niveau de service offert à l'usage. Dans ce cadre et dans un contexte de développement durable et de la préservation de l'environnement, les travaux d'entretien de la chaussée de l'autoroute Had Soualem – El jadida ont prévu le recyclage du béton bitumineux semi grenu à extraire de l'ancienne chaussée. En effet, le recyclage est aujourd'hui, une réponse logique permettant de réduire la consommation de granulat et de liant bitumineux. Il permet en outre, de réduire le coût énergétique imputable à leur fabrication et de réduire également celui de leur mise à disposition.

Ainsi, le recyclage des enrobés de ce tronçon d'autoroute a été réalisé dans le but de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf en réutilisant le plus possible de matériaux récupérés (bitume et granulats) et ce moyennant quelques aménagements au niveau de la centrale d'enrobage classiques de type discontinu.

2- GENERALITES ET CONSISTANCE DES DIFFERENTS CATEGORIES DES TRAVAUX D'ENTRETIENS

2.1- Cycle de vie d'une chaussée-importance des travaux d'entretiens

En général, le cycle de vie d'un projet routier comporte les étapes suivantes.

- 1-Conception et planification,
- 2-Construction ou la chaussée en parfaite état,
- 3-Apparence des dégradations au niveau de la chaussée,
- 4-Détérioration structurelle de la chaussée.

En effet, sous l'action du trafic et des agressions climatiques, les chaussées vieillissent, ce qui conduit au terme de leur durée de vie, à des couches ne présentant plus les caractéristiques compatibles avec les fonctions demandées.

Ainsi, étant donné que pour ces projets sont alloués des investissements lourds où les travaux d'entretiens représentent une part importante, en vue d'assurer de manière permanente le confort, la sécurité, conserver et améliorer la qualité d'adhérence des chaussées, ces dernières sont refaites en moyenne tous les dix ans. Devant un tel enjeu, la société ADM conduit une politique stricte de surveillance de son réseau autoroutier dans le but d'établir des programmes d'entretien adaptés à chaque axe autoroutier.

Dans ce sens, le programme des travaux d'entretiens lancé en 2016-2017 a inclus l'axe de Had Soualem-El jadida.

2.2- Rappel des différents types de travaux d'entretiens

Selon l'état de dégradation d'une chaussée, le trafic, les contraintes économiques et environnementales, les différentes techniques recensées pour sa réfection portent sur les travaux suivants :

- Travaux d'entretiens préventifs : appliqués avant la détérioration de la chaussée dont les techniques utilisées comprennent le scellement des fissures, le resurfaçage en couches minces, l'enduit superficiel, l'enrobé coulés à froid ou à chaud et le drainage.
- Travaux d'entretiens correctifs : effectués pour le traitement des défauts localisés par une reprise avec des enrobés à chaud ou à froid ; thermo régénération.
- Travaux de réhabilitations (mineures ou majeures) : réalisés pour rétablir la surface ou la capacité structurelle de la chaussée. Ce type de travaux est généralement recommandé pour le traitement des affaissements, ornières, arrachements, désenrobages, pelades, fissurations excessives, ressues et pertes de profil liées à un manque de capacité structurelles.

Dans ce dernier cas, la tendance a essentiellement été de réutiliser les matériaux existants dans une fonction moindre, étant donné que la route détient un gisement important de ces matériaux.

Il existe de nombreuses techniques de réutilisation des agrégats d'enrobé. Celles-ci se distinguent par la température à laquelle l'enrobé est produit. L'enrobé peut être produit à chaud ; à une température comprise entre 160°C et 180°C, ou à froid, à la température ambiante. Elles se différencient aussi par le déplacement ou non des matériaux prélevés dans la chaussée et devant être réutilisés, ainsi le recyclage peut s'effectuer :

- en place, par chauffage, scarification du revêtement, malaxage avec les correctifs nécessaires et remise en œuvre du mélange,
- en centrale, avec un apport variable de granulats et de liant. Dans ce cas les enrobés bitumineux de récupération peuvent provenir d'opérations de rabotage, fraisage, thermorégénération ou plus généralement d'interventions diverses sur chaussées.

Ces techniques utilisent des liants hydrocarbonés ou hydrauliques. Le recours aux diverses techniques possibles de réemploi des agrégats d'enrobé résulte d'un choix technique dépendant des performances recherchées du matériau produit et des usages résultants du développement des techniques propres à chaque pays. Ces techniques sont illustrées sur la figure Fig. n° 1.

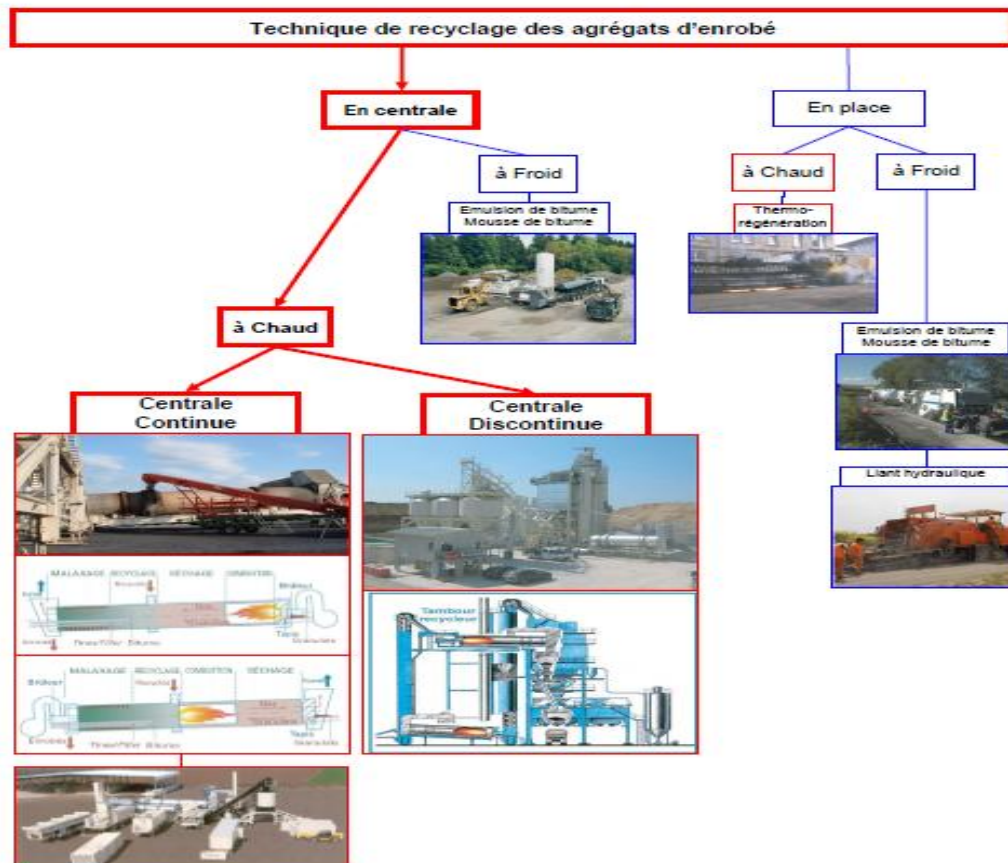


Fig.n°.1 : Présentation des possibilités techniques de recyclage des chaussées bitumineuses

3- PRESENTATION DU PROJET

L'autoroute Had Soualem-El jadida réalisée entre 2001 et 2005 constitue l'un des plus importants tronçons du réseau autoroutier du royaume du Maroc. Elle a permis de soulager la Route Nationale 1 en reliant la capitale économique à El jadida sur une longueur de 64 km et concentre sur son tracé un trafic en croissance continue.

Les travaux d'entretiens de cet axe autoroutier prévus au programme 2016-2017 ont concerné les sections situées entre PK 143.4 au PK 159.6 dans le sens Had Soualem-El jadida et du PK 112 au PK130.8 et du PK 143.6 au PK 159.6 dans le sens El jadida-Had Soualem sur un linéaire total de 50.2 km.

Le but des travaux d'entretiens de l'autoroute Had Soualem-El jadida est de disposer d'une infrastructure pouvant supporter l'évolution croissante du trafic sur cet axe.

3.1- Etat de dégradation de la chaussée de l'autoroute Had Soualem – El jadida

À défaut d'entretien de la structure de chaussée en place, son vieillissement ou un mauvais choix de la technique initiale font apparaître, sous l'action du fort trafic, des dégradations classées en 2 familles : les dégradations superficielles et les dégradations structurelles. Le suivi de l'état de la chaussée sur le tronçon d'autoroute had Soualem - El jadida a permis de relever ces différentes types de dégradations à savoir :

3.1.1- Dégradations superficielles

Dans ces dégradations, on distingue :

- Les ornières qui traduisent le fluage dynamique de l'enrobé sous la charge d'un trafic important (ou canalisé) ou sous l'action de températures anormalement élevées (Fig. n°2).



Fig. n°2 : Dégradation superficielle caractéristique d'un orniérage des couches de surface

- La fissuration thermique occasionnée par l'exposition aux intempéries entraînant une rigidification de la couche de surface qui initie sous l'effet du trafic une fissuration par le haut de la couche (Fig. n°3).



Fig n°3 : Dégradation superficielle caractéristique de la fissuration par le haut des couches de surface

- Les arrachements dûs à l'utilisation d'un enrobé inadapté au trafic, en effet, une erreur dans la mise en œuvre ou un vieillissement extrême de la couche de roulement peuvent se traduire par un départ localisé des matériaux de la chaussée.
- L'usure liée aux dégradations de la couche de roulement, qu'elle soit naturelle ou prématurée, résulte d'un polissage, sous l'action du trafic, des granulats qui n'assurent alors plus suffisamment l'adhérence du pneumatique.

3.1.2- Dégradations structurelles affectant les couches inférieures de la chaussée :

Les dégradations structurelles, mettant en péril la structure de la chaussée, se déclenchent en profondeur dans les couches d'assises et apparaissent en surface. Suite à un sous dimensionnement ou à un vieillissement avancé de la chaussée, celle-ci ne possède plus la résistance mécanique nécessaire pour s'opposer aux contraintes qu'induit le trafic. Ainsi, une fracture de fatigue s'initie au sein des couches d'assises. Invisible au moment de sa création, celle-ci se propage sous l'action des sollicitations et apparaît en surface sous la forme de fissures longitudinales au droit des passages de roues. La fissuration se présente sous deux formes : l'une unique (Fig4) et l'autre ramifiée (Fig. 5) (peau de crocodile).



Fig. n°4 : Dégradation structurelle caractérisant l'usure des couches d'assise
Traduite par une fissure longitudinale unique



Fig n°5 : Dégradation structurelle caractérisant l'usure des couches d'assise
Traduite par une fissure longitudinale ramifiée

3.2- Choix destechniquesd'entretiens de la chaussée

Généralement, le choix des techniques d'entretiens des chaussées dépend essentiellement de la stratégie d'entretien adoptée, de l'évolution du comportement des chaussées en fonction du trafic, du climat et de l'environnement de la route. La société ADM plaçant l'innovation et le développement durable au cœur de sa politique de maintenance du réseau autoroutier, pour les travaux d'entretiens de la chaussée de l'autoroute Had Soualem – El jadida ,a prévu le recyclage du béton bitumineux semi grenu à extraire de l'ancienne chaussée généralement utilisé pour le traitement des dégradations citées plus haut.

3.2.1 Domaine d'emploi

Le recyclage à chaud ne concerne que les granulats liés avec du bitume, il permet, à partir des matériaux existants dans la chaussée de reconstituer une nouvelle couche de roulement, d'assise ou de liaison.

Cette technique consiste au remplacement de toute ou une partie de la structure routière. Cette opération débute par la déconstruction ou la démolition des couches concernées par les dégradations et se termine par la mise en œuvre d'enrobés bitumineux en lieu et à la place des couches retirées.

Dans le cas où l'opération d'entretien vise à corriger des dégradations structurelles, où il peut être intéressant de récupérer la couche de roulement en béton bitumineux, pour la recycler en couches de surface plutôt que de l'enterrer sous la nouvelle structure, il est à noter que la déconstruction de la chaussée par couches successives permet de séparer les granulats de la couche de roulement (sélectionnés pour pérenniser le contact route / pneumatique) et les granulats des couches inférieures. Ainsi, à la différence de la démolition, la déconstruction permet de trier qualitativement les déchets bitumineux en fonction des caractéristiques fonctionnelles des couches concernées.

3.2.2. Avantages et limites et de la technique de recyclage à chaud

Les avantages du recyclage sont multiples, dont les plus importants se résument comme suit :

- Économie des ressources (Granulats et bitumes),
- Intérêt économique croissant lié aux évolutions du prix du bitume,
- Recyclage possible dans presque tous les produits et toutes les couches,
- Respect de l'environnement en limitant la pollution et réduction du coût énergétique liés à l'acheminement des matériaux,

Les limites de cette technique se trouvent dans :

- Le pourcentage maximum de recyclés dans la formulation (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, ...);
- La nature et le vieillissement du bitume recyclé et son incidence sur les performances du nouvel enrobé ;
- Le type de centrale d'enrobage, continue ou discontinue, utilisé pour produire la nouvelle formulation (ajout d'un organe de pesage, vitesse adaptée de Malaxage, reprise adaptée des agrégats, insertion d'un anneau de recyclage en partie médiane du Tambour sécheur, ajout d'un tambour à Contreflux ou mieux d'un second tambour tiédisseur dédié au recyclé) ;

- La qualité des agrégats, leurs caractéristiques, généralisation du fraisage couche par couche ;
- Les conditions de stockage des agrégats (Taux d'humidité) ;
- L'aptitude de l'enrobé au compactage sur chantier qui est en étroite relation avec sa maniabilité et son degré de durcissement lié au grade de bitume utilisé et celui du recyclé 20/30, 40/50).

4- DESCRIPTION DES TRAVAUX

L'exécution des travaux d'entretien de l'autoroute Had Soualem – El jadida ont prévu la réalisation de :

- Rabotage de la voie lente sur une largeur de 3,5 m sur une épaisseur de 7 cm, rechargement par un enrobé EME de classe 2 et réalisation d'une couche de roulement généralisée de 6 cm en BBME sur toute la largeur (10m). La largeur et l'épaisseur de rabotage sont prévues d'être ajustées en fonction de l'état du support et dans le cas de présence de dégradations dont l'étendue dépasse la largeur de rabotage prescrite.

ou

- Reprise de la couche de roulement avec un rabotage sur toute la largeur et sur une épaisseur de 7 cm, et réalisation d'une couche de roulement de 7 cm en BBME sur toute la largeur.

De ce fait, ces travaux d'entretien ont nécessité :

- La mise en œuvre de tous les matériaux nécessaires à la réalisation des différentes couches de chaussée.
- Le rabotage, la découpe, le sciage et la démolition des chaussées existantes.
- Le recyclage des fraisats du chantier à hauteur de 20% pour l'EME ;

Les structures de renforcement et de restructuration de la chaussée sont données par le programme suivant :

Tableau n° 1 : Programme des travaux d'entretien

Sens	PKD	PKF	linéaire	Ep. rabotage		EME		BBME	
				VL	P. larg	VL	P. larg	VL	P. larg
HS - J	143.400	159.600	16.200		7				7
J - HS	112.800	130.800	18.000	7		7			6
	143.600	159.600	16.000		7				7

5- OPERATIONS PREALABLES A L'EXECUTION DES TRAVAUX

La technique de recyclage des enrobés nécessite un certain nombre d'opérations préalables à l'exécution des travaux à savoir :

- Récupération des matériaux bitumineux et leur transformation en matériaux recyclables.
- Formulation de l'enrobés de recyclage à partir d'un enrobé récupéré représentatif en vue de faire le choix sur la nature et la granularité des granulats d'apport, ainsi que la nature et la quantité de liant d'ajout.

5.1- Transformation des matériaux bitumineux en matériaux recyclables

5.2.1-Extraction et élaboration des agrégats d'enrobé

Les matériaux bitumineux récupérés deviennent recyclables par une transformation de concassage et criblage, selon le processus décliné dans la norme NF EN 13108-8 (EN 13108-8 2016). Par cette transformation, ils deviennent des agrégats d'enrobé (AE) qui sont définis comme « des enrobés provenant du fraisage de couches d'enrobé, de concassage de plaque extraites de chaussée enrobés, de morceaux de plaques d'enrobé, de déchets d'enrobé ou de surplus des productions d'enrobés. ».

5.1.2-Moyens utilisés pour la récupération des agrégats

Les principaux moyens utilisés pour la récupération des agrégats sont :

- Les fraises qui permettent de produire les matériaux à réutiliser. L'opération consiste à enlever des matériaux sur une épaisseur déterminée, par action d'un tambour équipé de dents, de pics ou de couteaux. Elle peut s'effectuer à froid ou à chaud. Le chargement des camions est réalisé soit par la machine de fraisage elle-même, soit par un matériel spécifique.
- Pelle et brise roches qui produisent des croutes de plaque et nécessitant le passage dans une installation de concassage et criblage

L'étape de rabotage conditionne la qualité de la granulométrie agrégats d'enrobé. Pour maîtriser la granulométrie des agrégats d'enrobé notamment le D_{max}, une planche d'essais de rabotage doit être effectuée au préalable pour déterminer la vitesse d'avancement du matériel.

5.1.3. Caractérisation des agrégats d'enrobés –possibilité d'utilisation

5.1.3.1.Caractéristique des agrégats d'enrobé

Avant la réalisation d'un chantier, il faut procéder à une analyse précise de l'ancien enrobéportant sur :

- L'identification convenable des agrégats d'enrobés en déterminant l'ensemble des caractéristiques exigées pour le granulat d'apport dont les spécifications à respecter sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau n° 2:Exigences sur la granulométrie des agrégats d'enrobés

%passant à1,4D	%passant à D	%passants à 2mm	% passant à 0,063mm	Classe
Vsi99	Li 85 Ls 99 e 10	e 15	e 4	G1
Vsi99	Li 80 Ls 99 e 15	e 20	e 6	G2
Non spécifiée	Non spécifiée	Non spécifiée	Non spécifiée	G NS

(*) Il est à noter que les définitions de D, Vsi, Li, Ls et e sont celles de la norme NF P 18-545

En fonction des résultats de caractérisation des agrégats ainsi définie, le tableau ci-après précise les limites d'utilisation des agrégats dans les enrobés.

- La détermination de la teneur en liant et la caractérisation de ses performances notamment la pénétrabilité et Point de ramollissement du liant après récupération de liant. En effet, le bitume issu du rabotage qui sera mobilisé au contact du bitume d'apport est plus dur suite à :
 - ✓ Son vieillissement lors de la fabrication en centrale
 - ✓ L'impact des ultraviolets lors de l'utilisation de la route

Pour cela, il est nécessaire de prélever des échantillons représentatifs.L'analyse de ces échantillons fournit des renseignements utiles sur les caractéristiques des granulats d'enrobés et la consistance du bitume, afin de déterminer le mieux possible, le type et la proportion des granulats d'apport et de liant d'apport. Il est à noter que plus l'agrégat sera bien identifié, plus il pourra être incorporé dans l'enrobé.

Sur la base des caractéristiques obtenues, en se référant à la norme NF EN 13108-8 (2016), on détermine la classification des agrégats d'enrobé selon le tableau ci-après.

Tableau n° 3 :Classification des agrégats d'enrobés et du liant à recyclerdu guidetechnique SETRA de juillet 2004

Classification de l'étendu de la teneur en liant	Etendue de la teneur en liant	$\leq 1\%$	TL1
		$\leq 2\%$	TL2
		$>2\%$	TL NS
Classification de la pénétrabilité et de la TBA du liant	Pénétrabilité en 1/10mm	Minimale = 5 et étendue ≤ 15	B1
	TBA en °C	Maximale = 77 et étendue ≤ 8	
	Pénétrabilité en 1/10mm	Minimale = 5	B2
	TBA en °C	Maximale = 77	
	Pénétrabilité en 1/10mm	A déclarer	B NS
	TBA en °C	A déclarer	
Classification des agrégats selon les caractéristiques intrinsèques des granulats	Dureté et angularité	Code A ou B et code Ang 1 pour les gravillons et sables	R1
		Code C ou non caractérisé	R NS

5.1.3.2.Possibilité d'utilisation des agrégats d'enrobé

Les différents emplois possibles des agrégats d'enrobés dans la formulation d'enrobés neuf selon leurs compositions et caractéristiques sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau n° 4 :Différents emplois possibles des agrégats d'enrobés dans la formulation d'enrobés neuf en fonction du taux de recyclageselon guidetechnique SETRA

Couche des agrégats d'enrobés								
Usage dans la chaussée	Roulement		0%	10%		30%	10%	40%
	Liaison		10%	20%	30%	40%		
	Assise							
Composants de l'agrégat d'enrobé	Liant bitumineux	Teneur	TL NS	TL2		TL1		
		Pénétrabilité et TBA	BNS		B2	B1		
	Granulats	Granularité	GNS		G2		G1	
		Caractéristiques intrinsèques	RNS			R1	RNS	R1

On voit que les agrégats d'enrobés peuvent être utilisés avec un certain pourcentage (Taux de recyclage : rapport entre la masse d'agrégats d'enrobés sec et la masse totale d'enrobés secs).Ceci conduit à distinguer deux techniques de recyclage en centrale, le recyclage à faible taux et le recyclage à fort taux. On considérera que le taux est faible lorsqu'il est compris entre 10 et 20 % et qu'il est fort entre 40 et 65 %. Ce découpage arbitraire n'interdit en rien de recycler à des taux compris entre 20 et 40 %.

5.1.4. Constitution des stocks des Agrégats d'enrobés

Par le procédé de récupération des agrégats d'enrobés rappelé auparavant, un lot de ce matériau a été constitué pour les travaux d'entretien de l'autoroute Had Soualem – El Jadida. A titre d'illustration, la figure.n°6 présente un exemple de lot d'agrégats d'enrobé obtenu après son élaboration.



Fig. n°6 : Agrégats d'enrobé après constitution d'un lot obtenu par concassage et criblage

Suite à quoi, le laboratoire de l'entrepreneur a procédé à la caractérisation du stock par les mêmes essais à réaliser sur les granulats d'apport à savoir :

- La granularité au Tamis imposés : 0,063 μ m, 2 mm, D et 1,4 D.
- Caractéristiques intrinsèques : Résistance à l'usure (CA, MDE, LA).

Ces contrôles ont été exigés pour assurer l'homogénéité, la régularité de la fabrication ainsi que la constance du niveau de la qualité requise d'usage. Il importe de préciser que les performances mécaniques de l'enrobé recyclé sont en relation avec son degré d'homogénéité au terme de la fabrication.

Les fréquences de prélèvements à respecter sont celles décrites dans la norme de référence.

5.2. Formulation de l'enrobés de recyclage

5.2.1. Composition de l'enrobés de recyclage-définition

Un enrobé bitumineux contenant des agrégats d'enrobé est un mélange entre des matériaux neufs dits d'apport (granulats d'apport : GA et de liant d'apport : LA) et des agrégats d'enrobés : AE. Il est normativement défini par le terme enrobé de recyclage - ER selon (NF P98-149 –Version 2000).

5.2.2. Consistance de l'étude

Pour les travaux d'entretiens par recyclage des enrobés, il est nécessaire d'effectuer une étude préalable approfondie de l'enrobé à traiter portant en particulier sur :

- L'analyse de l'enrobé en place : compacité, teneur en liant, granulométrie ;
- L'analyse du liant contenu dans l'enrobé en place ;
- La recherche et dosage de l'agent correcteur à partir de la pénétrabilité du liant en place et de la pénétrabilité finale désirée ;
- La recherche de la formulation de l'enrobé correcteur en fonction de la courbe granulométrique finale désirée, de la granulométrie et du pourcentage de cet enrobé correcteur,
- La vérification des caractéristiques des performances de l'enrobé recyclé, selon la même démarche de formulation appliquée pour un enrobé à chaud n'intégrant pas d'agrégats d'enrobés. Les 4 niveaux restent valables et les exigences à atteindre sont les mêmes.

Les premières analyses doivent être effectuées en phase d'APD pour vérifier notamment l'utilité du recyclage et définir le taux de recyclage pour l'exécution des travaux d'entretiens.

Les résultats de cette étude permettront aussi de choisir, le cas échéant, les matériaux et liants de correction pour obtenir une nouvelle couche d'enrobé de qualité.

Le tableau suivant présente, en fonction du taux de recyclage et le positionnement de la couche en béton bitumineux, les différents cas nécessitant une étude préalable en fonction du taux de recyclage.

Tableau n° 5 : Différents cas nécessitant une étude préalable en fonction du taux de recyclage

Positionnement dans la structure	Taux de réemploi	
	<10%	>10%
Fondation, base et liaison	Pas d'études Préalables requises	Caractéristiques des AE et formulation spécifique
Couche de roulement (BBSG < T1 BBM < T3)	Pas d'études Préalables requises	Caractéristiques des AE et formulation spécifique
Couche de roulement	Caractéristiques des AE et formulation spécifique	Caractéristiques des AE et formulation spécifique

NB : - BBSG : Béton Bitumineux semi grenu ; **BBM :** Béton Bitumineux Mince

- **T1, T3** :Classe de trafic
- **AE** : Agrégats d'enrobés

5.2.3. Paramètres essentielles

Les caractéristiques essentielles pour la formulation d'un enrobé recyclé sont liées à la part massique de liant d'agrégat d'enrobé présent dans les agrégats d'enrobé et la granulométrie des granulats d'agrégats d'enrobé.

5.2.4. Formulation des enrobés recyclés(EME de classe 2)

Pour l'exécution des travaux d'entretiens de l'autoroute Had Soualem-El Jadida, l'étude de formulation de l'enrobé recyclé a été menée de manière à démontrer l'aptitude à recycler à 20% (taux retenu au niveau du CCTP) pour parvenir aux performances d'un EME 0/14 de classe 2. En effet, elle a consisté à ajuster les caractéristiques du liant et des granulats d'apports en fonction des caractéristiques du liant et des granulats de l'enrobé à recycler afin que les caractéristiques de l'enrobé fabriqué soient conformes à celles d'un EME 0/14 de classe 2.

La formule a été retenue de façon qu'elle soit insensible aux variations prévisibles de la granulométrie et la MVRe (Masse volumique réelle de l'enrobé) qui constitue un point sensible étant donné qu'elle représente la référence à laquelle la qualité du compactage sera prononcée. Dans ce sens, une caractérisation rigoureuse du stock a été effectuée pour maîtriser les variations de la granulométrie et la MVRe. Le nombre minimal des échantillons testés lors des études de formulation est de 5. Par ailleurs, les performances ont été confirmées en laboratoire et au niveau de la centrale lors des opérations d'étalonnage et de réglage.

5.2.4.1. Caractéristiques des agrégats d'enrobés

Les résultats des extractions du liant et des analyses granulométriques obtenus sur les échantillons des agrégats d'enrobés utilisés pour la formulation de l'EME de classe 2 destiné au chantier sont donnés dans le tableau suivant :

% des passants											% Bitume	% Bitume Résiduel (*)
0,063 mm	0,08 mm	0,315 mm	2 mm	3,15 mm	6,3 mm	8 mm	10 mm	12,5 mm	14 mm	16 mm		
8.5	-	-	35	-	61	-	-	-	97	100,0	6,2	1.24
9.1	-	-	35	-	63	-	-	-	98	100,0	5,8	1.16

(*) Bitume jugé peu vieilli selon l'étude APD

En tenant compte du taux de recycle qui est de 20% et en se référant au tableau n° 4 présenté plus haut, aucune exigence n'est stipulée sur la classe et caractéristiques intrinsèques des agrégats d'enrobés.

5.2.4.2. Composition et performances de l'enrobé de recyclage (EME de classe 2)

Sur la base des résultats obtenus sur les caractéristiques granulaires des agrégats d'enrobés et la teneur en bitume apportée par ces derniers à utiliser à hauteur de 20%, la formule retenue pour la fabrication du béton bitumineux à module élevé (EME) de classe 2 pour l'exécution des travaux d'entretiens de la chaussée de l'autoroute Had Soualem – El Jadida est rappelée ci-dessous:

- 25% du sable 0/4mm Calcaire (carrière Ben slimane)
- 10% du sable 0/4mm Quartzite (carrière Bouskoura)
- 20% de la 4/10mm Quartzite (carrière Bouskoura)
- 25% de la 10/14mm Quartzite (carrière Bouskoura)
- 20% d'agrégat d'enrobé Autoroute Had soualem-El jadida.

La courbe de mélange correspondante à ce mélange est la suivante :

Tamis en mm	Courbe mélange										
	0,063 mm	0,08 mm	0,315 mm	2 mm	3,15 mm	6,3 mm	8 mm	10 mm	12,5 mm	14 mm	16 mm
Passant(%)	6.1	6.8	13	31	40	52	59	71	-	97	100

Le dosage en bitume retenu est :

- Bitume Total : 5.8%
- Bitume rajouté : 4.8% de grade 20/30
- Bitume apporté par 20% d'agrégat : 1% de grade 10/20 à 20/30

A noter que lorsque le liant est peu vieilli ou le taux de recyclage est faible, un bitume mou classique convient, mais dans le cas contraire, il est indispensable d'employer un liant d'ajout spécialement conçu. En effet, un liant vieilli qui n'a plus le comportement rhéologique d'un liant neuf (sa pénétrabilité a diminué et sa composition chimique a évolué : baisse de teneur en huiles aromatiques et accroissement de la teneur en asphaltènes), il sera nécessaire de le régénérer par un mélange intime avec un liant d'ajout qui ramènera la pénétrabilité et la

composition chimique du mélange au voisinage de celles d'un bitume routier classique.

Les performances de l'enrobés de recyclage (EME de classe 2) obtenues lors de ces essais d'études sont comme suit :

- Module complexe à 15°C et 10 Hz : 15205 MPa
- Résistance à la fatigue à 10 °C et 25 Hz : 138 microdéf.

6- FABRICATION INDUSTRIELLE DES ENROBES RECYCLES

6.1. Caractéristiques et performances des centrales de fabrication

La fabrication industrielle des enrobés recyclés consiste à produire un enrobé dont la composition est proche de la composition déterminée lors des essais d'études au laboratoire au moyen d'outils de production techniquement adapté à la fabrication d'enrobé recyclé.

Les centrales pouvant être utilisées pour les travaux d'entretiens par le recyclage à chaud de l'ancien enrobé sont essentiellement des centrales continues ou discontinues.

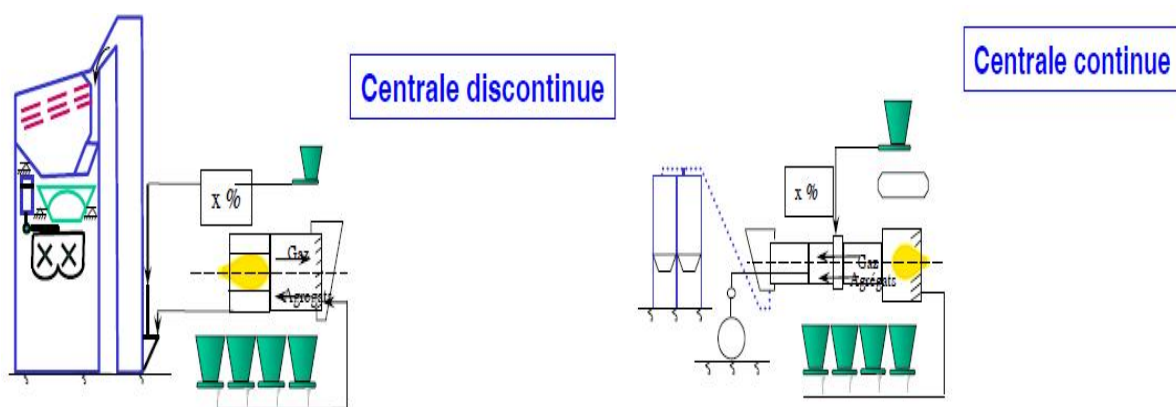


Fig. n°7 : Différents types de centrales

L'aptitude au recyclage des centrales d'enrobage est liée principalement à la nature des échanges thermiques qui régissent le processus de fabrication. En effet, Différentes solutions sont possibles pour incorporer les enrobés à recycler, ces solutions nécessitent l'emploi d'un doseur ayant une trémie spéciale apte à assurer un bon écoulement des matériaux à recycler, on distingue :

1. Incorporation au pied de l'élévateur à chaud où le chauffage des matériaux des agrégats d'enrobés se fait par contact avec les matériaux d'apport à la sortie du bruleur.
2. Incorporation dans la trémie peseuse où le chauffage des matériaux se fait dans le tambour sécheur
3. Autres types d'incorporation (par anneau d'introduction au niveau du tambour sécheur)

Les trois modes d'introduction s'inscrivent dans la logique des recommandations figurant dans tableau suivant qui présente, selon le type de matériel et le principe d'introduction des agrégats d'enrobés, la synthèse des possibilités en matière du taux de recyclage, type de centrale, et mode d'introduction des granulats.

Tableau n° 6 : Type de centrales selon le guide SETRA

Type de la centrale	Réintroduction des agrégats d'enrobés	Transfert thermique	Taux max recommandé	Facteurs limitatifs
Discontinue	Pied élévateur à chaud	conduction	15%	Evacuation vapeur d'eau et colmatage
Discontinue	Sécheur recycleur	conduction	25%	Colmatage élévateur à chaud
Discontinue	Sécheur spécifique pour les agrégats d'enrobés	Conduction + convection	50%	Environnement
TSE équicourant	Partie médiane du sécheur	Conduction + convection	30%	Colmatage à chaud
TSE contre-courant	Hors courant gazeux	conduction	50%	Surchauffe granulats Température tambour Température gaz

Les facteurs limitatifs sont indiqués en considérant les agrégats d'enrobés parfaitement homogène.

Il importe de préciser que tous les types de centrale peuvent être utilisés pour le recyclage à faible taux, seules les centrales à tambour sécheur enrobeur (TSE) peuvent recycler à des taux supérieurs à 20 %. Il y a lieu de noter que pour obtenir une fabrication de bonne qualité, il est recommandé de ne pas dépasser un taux de recyclage de 20 %.

Le poste de fabrication étant un élément important dans le processus de fabrication. Il convient, avant tout démarrage de fabrication, de procéder à la vérification et au calibrage de la centrale (vérification des différents organes de

la centrale, dont le pré doseur à AE). La vérification est à compléter par une épreuve de convenance de fabrication.

6.2. Niveau et capacité de la centrale utilisé au niveau de l'autoroute Had Soualem-El jadida

6.2.1. Rappel des Exigences du marché

La centrale doit être conforme au tableau n° 6 relatif au recyclage en centrale à chaud selon le guide technique SETRA de juillet 2004.

Pour le taux de recyclage visé dans le marché, les centrales à retenir sont :

- Centrale type tambour sécheur contre-courant avec réintroduction des agrégats d'enrobés hors courant gazeux.
- Centrale discontinue avec réintroduction des agrégats d'enrobés par un sécheur spécifique pour les agrégats d'enrobés, le transfert thermique étant assuré par convection conduction ;

Il est mentionné également que, dans le cas où l'entrepreneur ne dispose pas de l'une des centrales précitées, il devra justifier l'équivalence entre la Centrale proposée avec celles exigées par le CCTP.

6.2.2. Niveau et capacité de centrale utilisée

La centrale d'enrobage dédiée au chantier de renforcement de l'autoroute Had Soualem- Eljadida, est une centrale discontinue classique qu'elle nécessite une adaptation technologique pour permettre :

- L'incorporation de l'agrégat
- Eviter une chauffe excessive du liant apporté par l'agrégat.
- Assurer un transfert de chaleur entre les granulats d'apport et les agrégats d'enrobé.

La centrale est de niveau 2 tel que défini par les normes NF P 98-728-1 et NF P 98-728-2 et l'annexe A de la norme NF P 98-150, avec système d'acquisition des données conforme à la norme XP P 98-142-1-décembre 2003. La capacité de la centrale est de 250 tonnes/heure pour une teneur en eau globale de 5 %. Il est à noter, que plus l'hygrométrie est élevée, plus le temps de montée en température sera important et le débit de fabrication en sera affecté (risque d'attente entre les camions sur le chantier donc problème d'uni longitudinal).

6.3 .1^{er} mode de fabrication de l'ERau niveau de la centrale du chantier

6.3.1.Principe de fonctionnement

Les enrobés à recycler sont introduits dans le cycle de fabrication entre les opérations de séchage des granulats et de malaxage. Dans ce mode de recyclage, le réchauffage des enrobés à recycler s'effectue par contact avec les granulats neufs surchauffés.

6.3.2.Incorporation au pied de l'élévateur à chaud

La première méthode a consisté à utiliser l'élévateur à chaud pour introduire les matériaux à recycler (Voir la figure ci-dessous).

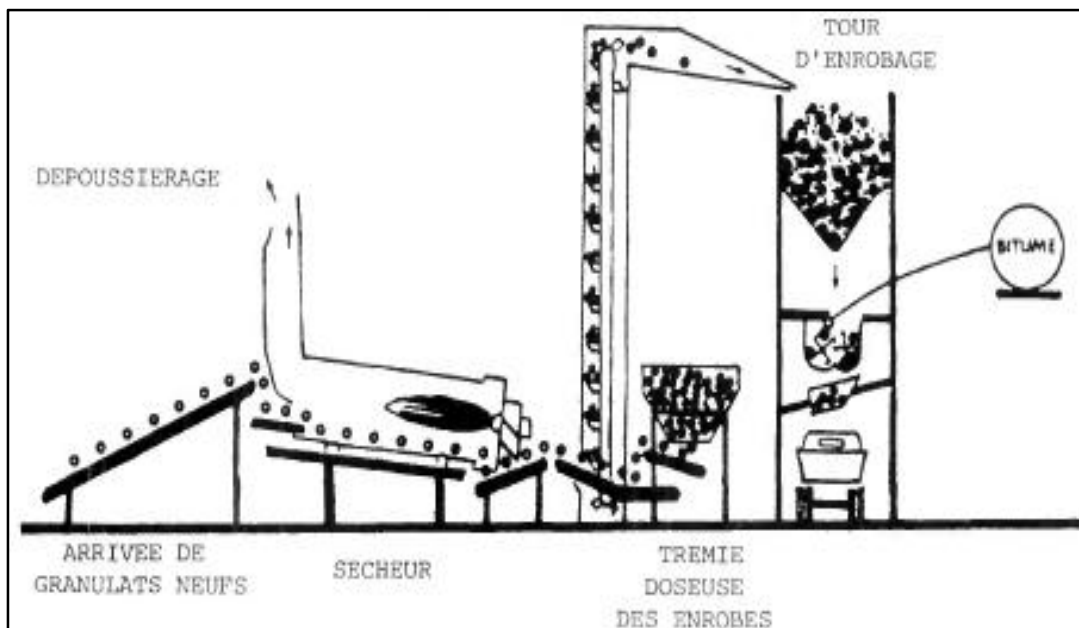


Fig.n°.8 : Schéma de principe du recyclage à faible taux en centrale classique

Cette méthode n'a pas donné les résultats escomptés notamment en termes de température d'enrobé fabriqué.

Avec ce mode de fabrication, Il ressort que la température des granulats d'apport doit être augmentée ce qui impacte la consommation en fuel et la durée de chauffage.

6.4 . Etude analytique du problème de transfert de la chaleur dans la fabrication de l'enrobé recyclé

Avant de proposer un deuxième mode de fabrication de l'enrobés recyclé, en vue de déterminer la solution la plus optimale pour ce recyclage dans la centrale du chantier, le laboratoire a utilisé la formule suivante permettant d'estimer la température des granulats neufs (Tg) en fonction de la température de fabrication des enrobés (Te), de la température des enrobés à recycler (Tag), de leur teneur en eau (Wr) et du taux de recyclage R afin que l'enrobé recyclé soit fabriqué avec une température de 170 °C, la température de consigne de préchauffage des granulats d'apport Tg doit être égale à 180°C et le taux de recyclage est de 20%.

$$T_g = (T_e - R \cdot T_{ag}) / (1 - R) + 4 \cdot R \cdot W_r \cdot (637 - T_{ag}) / (1 - R)$$

Les tableaux suivants illustrent les résultats des calculs linéaires de la température d'agrégat en fonction de sa teneur en eau :

1^{er} calcul : Tag=20°C et Wr allant de 1% à 9%

Température granulats chauffés	Température d'agrégat	Taux d'agrégat	teneur en eau d'agrégat	Température de l'enrobé
207,5	20	0,2	0	170
213,67	20	0,2	0,01	170
219,84	20	0,2	0,02	170
226,01	20	0,2	0,03	170
232,18	20	0,2	0,04	170
238,35	20	0,2	0,05	170
244,52	20	0,2	0,06	170
250,69	20	0,2	0,07	170
256,86	20	0,2	0,08	170
263,03	20	0,2	0,09	170

Un calcul itératif a été conduit afin de trouver le couple Wr et Tag qui donne une Tg au voisinage de 180°C.

2ème calcul : $W_r=0.01$ et $T_{ag}= 80^{\circ}\text{C}$

Température granulats chauffés	Température d'agrégat	Taux d'agrégat	teneur en eau d'agrégat	Température de l'enrobé
198.07	80	0.2	0.01	170

3ème calcul : $W_r=0.01$ et $T_{ag}=100^{\circ}\text{C}$

Température granulats chauffés	Température d'agrégat	Taux d'agrégat	teneur en eau d'agrégat	Température de l'enrobé
192.87	100	0.2	0.01	170

4ème calcul : $W_r=0.01$ et $T_{ag}=120^{\circ}\text{C}$

Température granulats chauffés	Température d'agrégat	Taux d'agrégat	teneur en eau d'agrégat	Température de l'enrobé
187,67	120	0.2	0.01	170

5ème calcul : $W_r=0$ et $T_{ag}=120^{\circ}\text{C}$

Température granulats chauffés	Température d'agrégat	Taux d'agrégat	teneur en eau d'agrégat	Température de l'enrobé
182.5	120	0.2	0.0	170

L'examen de ces résultats a montré que pour réussir le recyclage à hauteur de 20% d'agrégat d'enrobé dans des conditions techniques (Température de l'enrobé recyclé fabriqué de 170°C) et économiques (Température des granulats d'apport chauffés à 180°C), il est nécessaire de procéder à un séchage préalable des agrégats d'enrobé.

6.5 2^{ème} mode de fabrication de l'ER au niveau de la centrale du chantier

Au vu des résultats de l'étude analytique, le laboratoire a proposé d'introduire les agrégats dans une zone située en aval du brûleur central chauffant les granulats d'apport et le transfert thermique est assuré par convection conduction ;voir la photo ci-dessous.

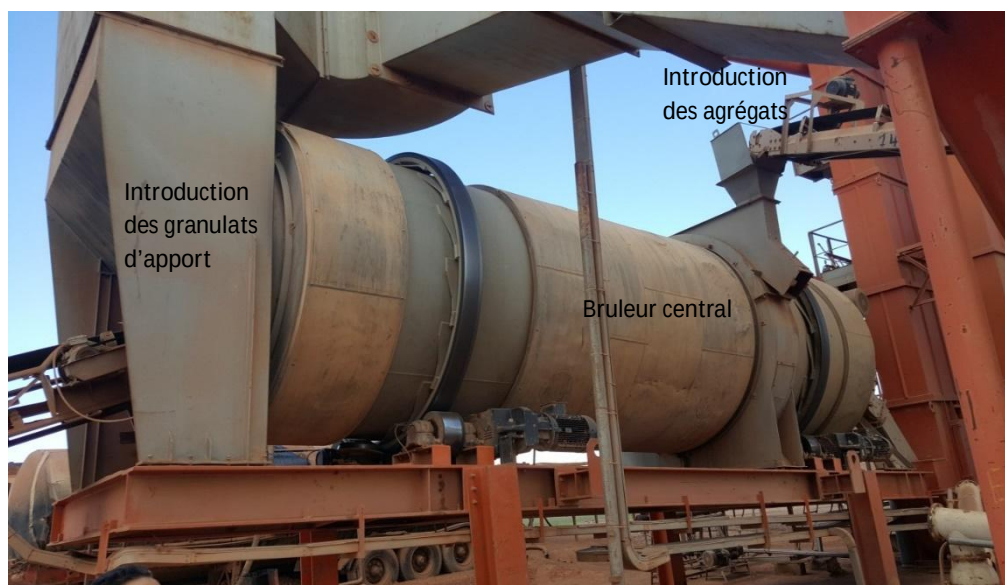


Photo n°1 :centrale de fabrication du chantier : un chauffage des granulats d'apport à contre-courant du flux gazeux ainsi qu'une zone d'introduction des agrégats située en aval du brûleur central.

A l'issu de cette modification, le suivi de la température de l'EME fabriquée donné des résultats concluants.L'ensemble de ces résultats sont détaillés ci-dessous.

7. RESULTATS DES ESSAIS DE CONTROLES ET SUIVI DES TRAVAUX

7.1 Caractérisation des agrégats d'enrobé du chantier d'autoroute Had Soualem-Eljadida

Etant donné que le bitume a été utilisé pour la 1^{ère} fois dans la chaussée et tenant compte des moyens techniques (fraisage, concassage) utilisés pour récupérer les agrégats d'enrobé, ces derniers sont constitués d'un liant particulièrement consistant (PenLAE faible 10 à 20 1/10mm et TBALAE haute 65°C à 75°C). Ces caractéristiques sont comparables à celles d'un bitume de grade 10/20 caractérisant les bitumes routiers les plus durs.

De plus, les caractéristiques de granulométrie des granulats d'agrégats d'enrobé du chantier, comparativement à celles d'un enrobé neuf, sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau n° 7 : Caractéristiques des Agrégats du chantier Had souale-EL jadida entre PK130+600 et PK 112+900

Désignation	% des passants											Dureté		% BITU ME	K
	0,063 mm	0,08 mm	0,315 mm	2 mm	3,15 mm	6,3 mm	8 mm	10 mm	12,5 mm	14 mm	16 mm	LA	MDE		
Nombre de prélèvements	17														
Min	9,4	9,7	18,2	35,7	43,8	60,7	69,7	74,7	89,9	96,8	100,0	20	15	5.5	3.0
Max	14,2	15,0	24,6	51,9	64,5	81,4	91,6	97,7	100,0	100,0	100,0			6.2	3.6
Mov	11.9	12.4	20.8	41.7	50.3	66.9	76.0	87.8	95.6	99.4	100.0			5.8	3.2

7.2 Contrôle de conformité et suivi de la température de l'enrobé fabriqué

Les tableaux suivants donnent un aperçu des résultats obtenus aussi bien pour la température de l'enrobé fabriqué que les essais d'extraction caractérisant l'homogénéité et la qualité de l'enrobé à la mise en œuvre.

7.2.1. Température de l'EME fabriqué

Tableau n° 8 : Suivi de la température de l'enrobé fabriqué

Bilan statistique	Nombre de mesures : 459
Min	141
Max	179
Moy	157

7.2.2. Caractéristiques granulaires et dosage en bitume

Tableau n°9 : Caractéristiques granulaires et dosage en bitume de l'enrobé fabriqué

Désignation	Dosage en bitume %	Granulométrie en mm				
		%< 0.063mm	%< 2mm	%< 6.3mm	%< 14mm	k
Nombre de prélèvements	163					
Min	4,2	5,7	23,2	50,0	100	3,6
Max	6,4	8,3	34,8	67,9	100	3,9
Moy	5,9	6,8	29,3	56,9	100	3,7
Spécifications	5,55 à 6,05	5,1 à 7,1	28 à 34	48 à 56	93 à 100	>3,4

7.2.3. Résultats des essais de contrôles de densités in-situ

Tableau n°10 : résultats des densités in situ

Désignation	Densité corrigée	% vides
Nombre de prélèvements	641	
Min	2,254	1,8
Max	2,394	7,5
Moy	2,318	4,9
La moyenne du % de vide doit être inférieure à 6%		≤6

La modification de la centrale a confirmé la faisabilité du recyclage à chaud des matériaux issus du fraisage et criblage de l'ancienne chaussée de l'autoroute Had soualem-Eljadida.

8. Conclusion

Le recyclage des enrobés est avantageux autant du point de vue technique, environnemental qu'économique. En effet, il permettra de diminuer l'utilisation des ressources naturelles et de l'énergie de fabrication.

Par ailleurs, malgré de nombreuses contraintes d'exécution et les difficultés techniques liées aux travaux d'entretiens par recyclage de l'ancienne chaussée, il importe de conclure que grâce à une bonne préparation du chantier par un procédé approprié de récupération des matériaux bitumineux, une étude de formulation complète, ajoutée à quelques aménagements au niveau de la centrale en préconisant des solutions techniques bien adaptées, à l'anticipation des problèmes et leur traitement de façon rigoureuse, à la mise à disposition du matériel spécifique, ainsi qu'à l'assistance technique par des professionnels, les travaux d'entretiens au chantier de l'autoroute Had Soualem- Eljadida ont été réalisés selon la qualité requise.

Ainsi dans cette optique, avant d'entreprendre des travaux de rénovation ou d'entretien d'une chaussée, les gestionnaires routiers doivent de plus en plus promouvoir dans leur politique d'entretien une logistique de réutilisation et de recyclage des enrobés et ce en mettant en œuvre ce qui suit :

- Favoriser les techniques de recyclage à chaud dans les documents contractuels.
- Augmenter progressivement le taux de recyclage des fraisât dans les divers mélanges d'enrobés à chaud.
- Respecter des préalables et des phases clés qui constituent le gage de la réussite de cette technique de recyclage notamment une bonne caractérisation des agrégats d'enrobés.