

Réutilisation des fraisâts d'enrobés bitumineux dans les opérations d'entretien de la chaussée

Par **Mohammed CHAFII**

Chef de Service Chaussées & Assainissement

Autoroutes du Maroc

1. Préambule

Le présent article a pour objet de présenter de façon générale le contexte du recyclage des fraisâts d'enrobés bitumineux ainsi que les principes et modalités pratiques à mettre en place pour intégrer le recyclage des enrobés bitumineux dans les travaux d'entretien lourd des chaussées. Une première évaluation de la technique basée les données des chantiers réalisés par ADM depuis 2010 est également donnée par cet article.

Traditionnellement, les gestionnaires des réseaux routiers adoptent pour l'entretien des chaussées dégradées, l'une des deux techniques suivantes :

- Entretien par rechargement en apportant des matériaux neufs ;
- Reconstruction totale ou partielle de la chaussée sans valorisation des matériaux en place.

Sans revenir sur les modes de comportement et de dégradation des chaussées, il est nécessaire de rappeler que ces complexes multicouches peuvent être dégradés à différents niveaux de la structure et/ou du profil en travers. Cet aspect conduit les autoroutiers à rechercher d'autres alternatives en adoptant une approche d'optimisation de type « analyse de la valeur » lors de la définition des solutions d'entretien : restructurer la voie lente recevant le maximum du trafic poids lourds et améliorer les caractéristiques de surface par mise en place d'un tapis généralisé en béton bitumineux qui pourrait être mince.

Le recyclage en centrale à chaud des enrobés bitumineux constitue un élément de réponse à la nécessité d'entretenir efficacement les chaussées avec le souci d'une économie durable.

Il y a lieu de souligner que cette technique relativement récente au Maroc :

- Remonte aux années 1980 correspondant aux premières applications en Europe ;
- Est connue par tous les professionnels et est parfaitement maîtrisable ;
- Nécessite une bonne reconnaissance des matériaux à recycler « études préalables et de formulation » ;
- Est porteuse d'un développement tenant compte des contraintes d'environnement et des masses importantes des produits recyclables.

2. Contexte du recyclage des enrobés en centrale à chaud

Selon la finalité des travaux et les moyens à mettre en place, il est possible de distinguer entre quatre techniques de réutilisation des matériaux de couches de surface et de couches d'assises de la chaussée à entretenir :



Excepté quelques cas particuliers qui ont nécessité la réalisation de purges profondes pour reprendre ou retraiter les matériaux non liés des couches d'assises, l'essentiel des travaux d'entretien des chaussées d'autoroutes consistent en :

- Restructuration de la voie lente par fraisage partiel des enrobés en place et substitution par de nouveaux enrobés de type EME, GB ou BBME de liaison ;
- Rechargement de la totalité des voies par un tapis de béton bitumineux de type BBSG, BBME ou BBTM ou une combinaison de deux produits bitumineux ;

Ce choix technique génère des volumes importants de fraisâts qu'il n'est plus tolérable de les rejeter dans la nature pour les raisons suivantes :

- Raréfaction des ressources en granulats ;
- Coût élevés liés à l'ouverture et à l'exploitation des carrières ;
- Coût de transport des matériaux ;
- Augmentation soutenue des prix des bitumes et des carburants ;
- Fatigue accélérée des chaussées des itinéraires empruntés pour le l'approvisionnement des chantiers ;
- Contraintes liées à la protection de l'environnement ;

Depuis le démarrage en 2008 du grand cycle d'entretien des chaussées du réseau autoroutier en service et jusqu'à fin 2013, la production des fraisâts a atteint un volume de 121.500 m³.

Ce volume important de fraisâts a conduit ADM à penser au recyclage de ces matériaux dans les travaux de renforcement et utiliser les quantités excédentaires hors autoroute avec objectif d'atteindre zéro rejet.

Tenant compte du caractère industriel des chantiers autoroutiers et des délais réduits d'intervention, ADM privilégie la technique de recyclage des fraisâts d'enrobé en centrale à chaud « *traitement en centrale d'enrobage à chaud, généralement équipée d'un dispositif d'introduction des vieux enrobés, d'enrobés fraisés provenant ou non du même site, avec correction par apports de granulats neufs et de bitume ou de liant régénérant* ».

Cette technique a été adoptée par la Société Nationale des Autoroutes du Maroc depuis l'année 2010 dans le marché d'entretien de la chaussée de l'autoroute Rabat – Kénitra en adoptant un taux de 20% de recyclés. Cette technique a été adoptée pour les EME d'assise et BBME de liaison.

3. Organisation des études préalables

En dehors des considérations liées à la disponibilité et au choix du matériel d'enrobage, une étude de faisabilité du recyclage en centrale à chaud doit être réalisée par le Maître d'Ouvrage s'il souhaite l'intégrer dans son cahier des charges ou par l'Entreprise dans le cadre de solutions variantes si le Cahier des charges n'en prévoit pas. Dans tous les cas, cette étude doit être réalisée et peaufinée lors des études de formulation et doit s'appuyer sur les préconisations du guide technique de retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées (SETRA – Juillet 2004) et plus particulièrement sur le chapitre recyclage en centrale à chaud et de la norme NF EN 13 108-8 pour la caractérisation des agrégats d'enrobé.

A noter que le pourcentage admissible par type de produit est comme suit :

- BBSG et BBME : 10% en couche de roulement et 20% en couche de liaison ;
- EME et GB : 40%

L'étude préalable est précédée par la réalisation d'un programme de reconnaissance qui a pour objectif de:

- Reconnaître l'épaisseur de la chaussée existante au niveau des voies à fraiser ;
- Récupérer des échantillons pour permettre une reconnaissance des matériaux ;
- Caractériser les enrobés existants et valider les possibilités de réutilisation.

Ces opérations peuvent être effectuées par le Maître d'Ouvrage parallèlement aux études d'entretien de la chaussée sur la base des données d'analyse structurale des sections témoins. Elles requièrent la réalisation à minima des opérations suivantes :

3.1 Reconnaissance in situ :

Le programme de reconnaissance in situ doit comprendre à minima la :

- Réalisation de carottages dans la structure bitumineuse tous les 500m environs au niveau des zones à fraiser. Pour le cas des autoroutes, le pas de 500m peut être augmentée tenant compte de l'homogénéité des matériaux ;
- Récupération des échantillons référencés en fonction du PK et de la voie auscultées.

3.2 Essais de laboratoire :

L'ensemble des couches de la structure sera caractérisé par :

- Désenrobage des échantillons et détermination de la teneur en liant et la granulométrie du mélange ;
- Caractéristiques intrinsèques et angularités des granulats recyclés ;
- La caractérisation du liant vieilli par mesure de la pénétrabilité à l'aiguille à 25°C et du point de ramollissement par la méthode Bille Anneau.

La synthèse des données peut être présentée sous le format type suivant:

Carotte	Sens	Voie	PK	Epaisseur matériaux bitumineux (mm)			Couche analysée	Analyse granulométrique				Teneur en liant	Analyse bitume	
				BBR	BBL	GB		10mm	6mm	2mm	0.063 mm		PENE (1/100mm)	TBA (°C)
10	-	R	10	48	60	154	BBR	93	39	31	7.4	5.6		
9	-	L	9	30	67	163	BBL	88	55	32	6.5	5.1	22	64
8	-	R	8	28	79	163	BBL	74	53	33	7.6	5.1		
7	-	L	7	28	66	158	BBL	76	49	32	6.5	5	27	59
6	-	R	6	30	76	136	BBL	77	51	34	6.7	5.3		
5	-	L	5	30	60	165	BBL	79	50	33	7.7	5.2	17	66
4	-	R	4	28	82	144	BBR	94	45	31	7.2	5.3		
3	-	L	3	60	60	145	BBR	74	49	30	6.6	5.1	38	58
2	-	R	2	28	82	140	BBR	93	44	32	7	5.6		
1	-	L	1	80	68	157	BBL	83	56	34	7.8	5.2	29	57

L'exploitation des données de reconnaissance doit permettre de :

- découper en zone homogène la section de travaux en fonction du matériau ayant fait l'objet d'essais ;
- analyser par zone homogène, les résultats obtenus lors des essais sur les carottages réalisés.

Un exemple de découpage en zone homogène est donné par le tableau suivant :

Zone homogène	Matériau caractérisé	Epaisseur (mm)	PK (carotte)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BBR	48										
2	BBL	70										
3	BBR	28										
4	BBR	60										
5	BBL	68										

Le guide technique de retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées indique qu'un recyclage jusqu'à 40% est envisageable si les paramètres de caractérisation suivants sont respectés :

Usage dans la chaussée	Type de couche			Taux de réemploi					
	Couche de roulement			0	0	10 % sous condition ⁽¹⁾	30 %	40 %	
	Couche de roulement			10 %	20 %	30 %	40 %		
	Couche d'assise								
Informations sur les composants de l'agrégat	Liant	Teneur en liant	Etendue	Non spécifiée	≤ 2%	≤ 1%			
		Caractéristiques résiduelles (pénétrabilité ou TBA	Pénétrabilité 1/10 mm	Non spécifiées	≥ 5	≥ 5			
			Pénétrabilité étendue		-	≤ 15			
			TBA °C		≤77	≤77			
			TBA étendue		-	≤8			
	Granulats	Granularité	Passant à D Etendue	Non spécifiée	80 à 99 ≤ 15		85 à 99 ≤ 10		
			Etendue du passant 2mm		≤ 20		≤ 15		
			Etendue du passant à 0,08mm		≤ 6		≤ 4		
		Caractéristiques intrinsèques	Catégorie	Non spécifiées	B				
			Angularité		RC2				

(1) Si la teneur en liant moyenne de l'agrégat est supérieure à 5,5%, l'enrobé est considéré comme un BB dont les granulats ont été choisis selon des critères minimaux voisins de ceux qui sont recherchés pour le matériaux recyclé.

4. Dossier de Consultation des Entreprises (DCE)

Les points importants à faire apparaître dans le dossier de consultation des entreprises dans le cas où la stratégie de recyclage est retenue portent sur :

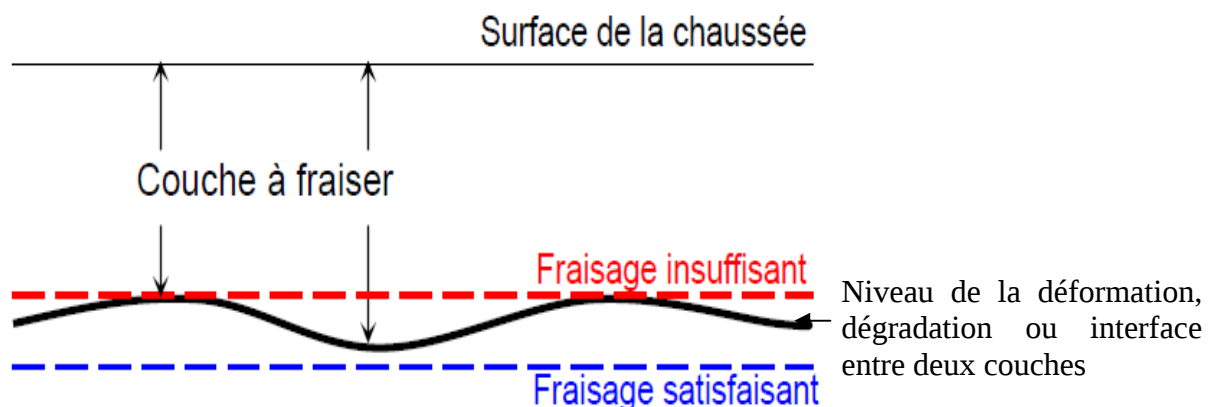
- le fraisage ;
- le stockage ;
- Etude de formulations
- les spécifications de la centrale ;

4.1. Fraisage

La phase de fraisage doit être menée de manière rigoureuse afin d'obtenir un fraisât le plus régulier possible en nivellement et en granularité et teneur en eau conformément à la note d'information N° 98 du SETRA sur le retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale. Le matériel de fraisage doit être conforme à la norme NF P 98 713.

Pour le fraisât destiné à être recyclé, une planche d'essai de fraisage doit être effectuée avant le démarrage des travaux pour déterminer les paramètres de fonctionnement des machines, la largeur de travail, la vitesse d'avancement, la vitesse de rotation de la fraise ainsi les caractéristiques de la fraise (nombre de dents, diamètres, etc). Si le chantier nécessite l'utilisation de plus d'une fraiseuse, il convient que les fraiseuses utilisées soient identiques ou suffisamment semblables pour produire un matériau homogène.

La surface après fraisage ne doit pas présenter des stries de profondeur supérieure à 5 mm. Les profondeurs de fraisages doivent être atteintes avec une tolérance de $\pm 0.5\text{cm}$.



Les matériaux fraisés sont immédiatement déplacés sans subir la circulation des véhicules. Le ramassage doit porter sur la totalité des matériaux fraisés, la surface rabotée étant balayée d'une manière suffisante pour qu'il ne subsiste plus aucun granulat décollé par le rabotage.

Une fois le fraisage réalisé, une réception du support sera réalisée afin de mettre en évidence les zones où l'interface entre les enrobés rabotés et ceux du support ne serait pas atteinte. Suivant les cas, un fraisage complémentaire pourra être réalisé afin d'atteindre cette interface. L'Entrepreneur procédera à une vérification des caractéristiques de la couche qui servira de support tant en nivellement qu'au niveau des dégradations de surface après rabotage. Pour ce type de vérification, on peut retenir un contrôle visuel pour éviter d'obtenir des effets de feuilletage entre les couches restant après rabotage et les futures couches d'enrobés.

Après l'opération de fraisage, l'Entrepreneur procédera à un balayage haute-pression soigné et à un nettoyage par grattage si nécessaire. Ces travaux feront l'objet d'une réception préalable avant application de la couche d'accrochage.

L'entrepreneur disposera en permanence et pendant toute la durée des travaux, d'un atelier de nettoyage efficace sur le chantier. Il est utilisé continuellement afin d'assurer une parfaite propreté des voies. Une balayeuse aspiratrice à haute pression sera imposée sur un support raboté. Le Maître d'œuvre doit arrêter le chantier si le nettoyage s'avère insuffisant et imposer le remplacement ou le renforcement du matériel de nettoyage.

Avant l'application de la couche d'accrochage, le fond de forme fraisé doit subir un nettoyage final (par balayage et/ou aspiration). Il doit être particulièrement soigné, notamment dans les angles, à la limite de la forme de fraisage et du champ de revêtement conservé.

4.2. Stockage des agrégats

Les stockages et reprises doivent être menés dans l'optique de favoriser l'homogénéité des agrégats d'enrobés indispensable pour la représentativité de l'étude, la régularité de la fabrication ainsi que la constance du niveau des qualités d'usage.

Une attention particulière devra être apportée aux conditions de stockage afin d'éviter les problèmes d'agglomération du fraisât, d'exposition aux sollicitations thermiques et de variation de la teneur en eau.

4.3. Etudes de formulation

Dans le cas où les agrégats d'enrobés sont caractérisables, l'étude de formulation comprendra en plus d'une étude classique:

❖ Identification des constituants

- quantification du stock en agrégats d'enrobés ;
- caractérisation des granulats naturels (NF EN 13-043)
- caractérisation des agrégats d'enrobés (XP P 98 135 remplacée par la norme européenne NF EN 13 108-8) :
 - granularité avant désenrobage
 - composition après désenrobage
 - ✓ granularité (homogénéité granulométrique)
 - ✓ teneur en liant (valeur moyenne et étendue)
- caractéristiques intrinsèques et angularité des granulats recyclés
- liant ancien : pénétrabilité minimale, TBA maximale et étendue

❖ Mise au point de la formule

A partir des paramètres déterminés précédemment, le taux de recyclage est calculé de manière à obtenir un enrobé ayant des caractéristiques similaires à celles d'un enrobé fabriqué sur la base de matériaux neufs. La détermination de la composition minérale de l'enrobé et le dosage optimal en liant régénérant se font sur la base d'essais classiques : PCG, Duriez et orniérage. Cette étude de niveau 2 peut être ramenée au niveau 3 (avec mesure du module du matériau) ou 4 (avec essai de fatigue) en fonction des exigences de cahier des charges et de la destination de l'enrobé à fabriquer.

- Détermination des pourcentages des différents constituants ;
- Choix du liant d'apport (classique ou de régénération)
- Caractérisation du liant d'apport ;
- Choix du taux de recyclage ;

Pour la mise au point de la formule, il est préférable d'utiliser des fraisâts issues d'une opération de fraisage par zone homogène au lieu des matériaux issus des carottages.

Le tableau ci-après donne une comparaison entre des formules adoptées pour un EME à base de bitume 20/30 avec et sans recours à la technique de recyclage en centrale à chaud.

Paramètres	Cahier des charges	EME sans recyclés	EME à 20 % de recyclés
Module de richesse	$\geq 3,4$	3,56	3,69
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NFP P98-252): % vide à 100 girations pour une EME 0/14	$\leq 6\%$	6,5%	5,85%
Essai Duriez à 18°C (NFP 98-251-1) R (après immersion)/R à sec	$\geq 0,75$	0,80	0,91
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'ornière en % de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10cm d'épaisseur, à 60 °C avec le bitume du chantier, à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 % après 30.000 cycles.	$\leq 7,5\%$	1,51	2,12
Essai de fatigue (NF P 98-261-1) : Déformation relative ϵ_6 à 10^6 cycles, 10°C et 25 Hz à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 %.	$\epsilon_6 \geq 130.10^{-6}$	$130,3 \cdot 10^{-6}$	$130,5 \cdot 10^{-6}$
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) : Module à 15°C et 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 3 et 6 %.	$E \geq 14000 \text{ MPa}$	14.876 MPa	14.429 MPa

4.4. Spécifications des centrales

La technologie du matériel joue un rôle important sur la qualité finale des enrobés. Le dosage des agrégats d'enrobés doit être assuré par un doseur pondéral muni d'une trémie de faible capacité de stockage apte à assurer un bon écoulement du produit (parois presque verticales, tapis d'extraction large, revêtement anti-colmatant). L'automatisme de la centrale doit être adapté pour prendre en compte les spécificités des agrégats d'enrobés (teneur en liant ancien) et, en fonction du lieu d'introduction de ces agrégats d'enrobés (déphasage avec des granulats naturels).

L'aptitude au recyclage des centrales d'enrobage est liée principalement à la nature des échanges thermiques qui régissent le processus de fabrication.

Il existe deux modes de transfert de la chaleur nécessaire au séchage des matériaux :

- les sècheurs à chaleur indirecte dits « à conduction » dans lesquels il n'y a pas contact entre le fluide sécheur et les matériaux ;
- les sècheurs à chaleur directe dits « à convection » dans lesquels les matériaux sont en contact direct avec les gaz de combustion. A l'intérieur du sécheur les gaz sont dirigés parallèlement au déplacement des granulats, soit à équicourant (les granulats et les gaz circulent dans le même sens), soit à contre-courant (les granulats et les gaz circulent en sens contraire).

Selon le type de matériel et le principe d'introduction des agrégats d'enrobés, la synthèse des possibilités en matière de taux de recyclage est donnée par le tableau suivant.

Type de centrale	Réintroduction des agrégats d'enrobés	Transfert thermique	Taux maxi recommandés	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	Convection + conduction	50%	Environnement
TSE équicourant	Partie médiane du tambour	Convection + conduction	30%	Colmatage filtre à manches
TSE contre courant	Hors courant gazeux	Conduction	50%	Surchauffe granulats Température tambour Température gaz

5. Suivi des travaux

Les grands travaux d'entretien réalisés par ADM présentent la particularité d'être réalisés en circuit fermé : l'enrobé fraisé est recyclé sur le site même d'où il a été extrait.

Les opérations de fraisage, fabrication avec recyclage et mise en place sont effectuées simultanément. Les ateliers de fraisage et de mise en œuvre sont décalés dans l'espace pour des considérations de phasage des travaux et d'exploitation de l'itinéraire sur lequel les travaux s'effectuent sous circulation.

Ce type de chantier peut être décomposé en plusieurs tâches, comme illustrées ci-après, qui s'enchaînent ou s'effectuent simultanément suivant le cas :

- **Récupération** des fraisâts ;
- **Stockage** des fraisâts avant et après concassage éventuel ;
- **Fabrication** des enrobés recyclés en respectant :
 - ✓ un chauffage et un séchage des enrobés récupérés sans dégradation du liant ancien ;
 - ✓ une protection efficace du liant de régénération, qui présente souvent une susceptibilité thermique plus importante que celle des liants classiques ;
 - ✓ un temps de malaxage permettant un mélange aussi parfait que possible entre le liant ancien et le liant de régénération ;
 - ✓ les règles habituelles pour la fabrication des enrobés traditionnels, et plus précisément l'homogénéité du produit final, le respect de l'environnement en matière d'émission de particules solides et de polluants gazeux ;

- **Mise en œuvre** des enrobés recyclés de façon classique par des ateliers traditionnels.

Ainsi, pour ces chantiers qui se prêtent à l'industrialisation, ADM a mis en place un plan assurance qualité de niveau B impliquant la mise en œuvre par l'Entrepreneur d'un contrôle interne de la production dont les principes généraux sont les suivants :

- Les prescriptions font l'objet d'un contrôle en cours de production : acceptation de matériel, dispositions pratiques,... .
- Les spécifications font l'objet des contrôles de conformité.

En plus du contrôle habituel des travaux d'enrobés à chaud neufs, il faut particulièrement contrôler les aspects suivants :

- La granularité apparente des agrégats à recycler ;
- La régularité du dosage en bitume des agrégats à recycler ;
- La température de fabrication de l'enrobé recyclé ;
- La pénétrabilité du bitume après enrobage avec caractérisation éventuelle de ces caractéristiques rhéologique en laboratoire ;



Opération de rabotage de la voie lente avec récupération des fraisâts



Concassage des fraisâts



Travaux de mise en œuvre de l'enrobé recyclé



Fabrication de l'enrobé recyclé (poste TSM équipé d'un anneau de recyclage)

6. Evaluation de la technique et perspectives

La technique de recyclages des enrobés en centrale à chaud constitue une solution intéressante pour l'entretien du réseau routier Marocain. Les premiers chantiers réalisés par ADM ont permis de vulgariser les règles relatives à la réalisation des études de laboratoire, la préparation des chantiers et la fabrication proprement dite des enrobés recyclés.

Trois ans après la mise en œuvre au Maroc d'enrobés recyclés (EME et BBME), il est possible de dresser le bilan suivant :

- Diminution dans les quantités de bitume d'apport de granulats neufs respectivement de 18 % et 20% pour taux de recyclage de 20% adopté actuellement par ADM ;
- Pas de surprises concernant la régularité du mélange minéral et de la teneur en bitume totale ;
- Les fraisâts excédentaires sont soit réutilisés au niveau des voies latérales de l'autoroute pour améliorer les conditions de leurs utilisation par les riverains, soit rachetés par l'entrepreneur en vue de les réutiliser au niveau d'autres chantiers. Ce choix permet de passer au recyclage en circuit ouvert et d'inciter en conséquence, les entrepreneurs à proposer cette technique comme solution variante pour le comptes d'autres Maître d'Ouvrage ;
- la fabrication en centrale continue de type TSE recycleur présente une bonne homogénéité ;
- la mise en œuvre est classique, avec toutefois une attention particulière pour le compactage du fait d'une grande maniabilité des enrobés recyclés ;
- il n'y a pas de vieillissement marqué du liant imputable au processus de fabrication ;
- l'obtention d'une bonne microrugosité ne pose pas de problème si la centrale de fabrication respecte les dosages définis par l'étude de formulation ;

La réussite de cette technique au Maroc suppose cependant :

- l'étude préalable du chantier avec la nécessité de vérifier l'homogénéité de la section à recycler, le taux de recyclage ainsi que la nature du régénérant et les caractéristiques de l'enrobé régénéré ;
- une phase de fraisage menée de façon rigoureuse de manière à assurer la régularité du fraisât (granulométrie et teneur en eau) ;

- de la prudence dans les cas où il y a cumul des risques constitués par le recyclage à taux élevé, une formulation conduisant à un excès de régénérant ou à une volatilité trop grande et un trafic intense et/ou canalisé ;
- une utilisation préférentielle des recyclés en couche de base et de liaison, en association avec une technique mince ou très mince pour les chantiers fortement sollicités ;
- Contribution active de l'entreprise et des laboratoires Marocains dans le développement du secteur d'entretien routier. Actuellement, le choix de cette technique à l'instar de toute autre technique alternative ne se concrétisent que sur l'initiative des Maîtres d'Ouvrages.

Tout bien considéré, la technique de recyclages des enrobés en centrale à chaud constitue une solution alternative fort intéressante pour l'entretien du réseau routier et autoroutier Marocain. Elle offre des opportunités diverses pour l'entretien des chaussées présentant des pathologies de type :

- Décollement des couches roulement à base de bitume classique ;
- Fissurations imputables au vieillissement du bitume ;
- Dégradations de voie lente : apport structural au niveau de la voie lente sans rehausse de la ligne rouge ;

Cette technique doit s'inscrire dans une nouvelle vision de l'entretien routier au Maroc axée, sur l'innovation et partagée par tous les opérateurs du secteur des BTP. La ROUTE du développement du Maroc passe obligatoirement par l'entretien de la ROUTE.