

Recyclage en centrale des matériaux de chaussée

par **Jean-Pierre SERFASS**

Ingénieur civil des Mines. Consultant

1. Recyclage d'enrobés	C 5 620 - 2
1.1 Quelques chiffres	— 2
1.2 Dispositions et études préalables	— 2
1.2.1 Grandes opérations	— 2
1.2.2 Recyclage courant	— 2
1.3 Recyclage à chaud en centrale.....	— 3
1.3.1 Taux de recyclage	— 3
1.3.2 Études de formulation. Consistance et méthodologie.....	— 3
1.3.3 Fabrication	— 4
1.3.4 Domaines d'emploi. Performances	— 6
1.4 Recyclage à froid en centrale.....	— 7
1.4.1 Description générale.....	— 7
1.4.2 Taux de recyclage	— 8
1.4.3 Études de formulation. Consistance et méthodologie.....	— 8
1.4.4 Fabrication et mise en œuvre	— 10
1.4.5 Domaines d'emploi. Performances	— 11
1.5 Recyclage à tiède	— 11
1.6 Recyclage au liant hydraulique.....	— 11
1.7 Recyclage des enrobés spéciaux.....	— 12
1.8 Rôle du bitume recyclé	— 13
2. Recyclage de matériaux blancs	— 13
2.1 Préparation et caractérisation	— 13
2.2 Recyclage dans un matériau non traité.....	— 13
2.3 Recyclage dans un matériau hydraulique.....	— 13
3. Conclusion	— 13
Pour en savoir plus	Doc. C 5 620

Le recyclage des matériaux routiers est une impérieuse nécessité vis-à-vis de la protection de l'environnement : économie de ressources naturelles (granulats), d'espaces naturels (décharges), d'énergie, réduction des gaz à effet de serre.

Tous les matériaux routiers sont recyclables. Ils peuvent être réutilisés, soit en centrale, soit en place. Le recyclage en place procure des économies de transport supplémentaires (voir dossier [C 5 622]).

Il existe tout un éventail de techniques de recyclage dont le choix dépendra de la nature du matériau à réutiliser, de son mode de traitement, et de la destination finale du produit en résultant. Le degré de pénétration des opérations de recyclage est très variable d'un pays à l'autre, et même d'une région à l'autre. Ainsi, en Europe du Nord, le recyclage est quasiment systématique. Aux États-Unis, la situation est fort différente d'un état à l'autre. Quel que soit le pays, le recyclage s'est développé plus tôt et plus vite dans les zones fortement urbanisées, confrontées à l'éloignement croissant des carrières et à la rareté des sites de décharge.

En France, les recyclages et retraitements ont démarré vers la fin des années 1970, à la suite du premier choc pétrolier. Leur développement a ensuite été plutôt lent, du fait de l'abondance des carrières et des postes d'enrobage.

La situation a toutefois commencé à changer significativement dans les années 1990, avec l'apparition d'une législation plus sévère, interdisant, en particulier, la mise en décharge de matériaux autres que les déchets « ultimes » (non réutilisables) et imposant de valoriser les matériaux existant dans des chaussées (loi du 13 juillet 1992). Depuis, l'augmentation du prix de l'énergie et du bitume a fait le reste, si bien qu'aujourd'hui, le recyclage des matériaux routiers est à peu près systématique. Par contre, comme on le verra plus loin, leur valorisation n'est pas encore maximale.

Dans les pays industrialisés, où il y a une forte densité d'installations fixes de fabrication de matériaux, une large part du recyclage s'effectue en centrale. Le développement du recyclage en centrale a nécessité – et nécessite encore – d'importants investissements de la part des entreprises pour adapter et compléter le matériel, aménager des plates-formes de stockage pour les matériaux à recycler, organiser les circuits de collecte, étudier les formulations, et mettre en place des plans d'assurance-qualité adéquats. Ces efforts ont abouti à la mise au point d'une large gamme de techniques et de matériaux qui sont présentés ci-après.

1. Recyclage d'enrobés

1.1 Quelques chiffres

En France, la quantité d'enrobés produite annuellement oscille entre 40 et 45 millions de tonnes. Chaque année, environ 6 millions de tonnes sont enlevées des chaussées, soit par fraisage, soit par relevage. En 2001, près de 40 % étaient réutilisés sans traitement, en accotements, sous-couches, chemins ruraux, pistes de chantier, etc. Seulement 10 % étaient recyclés – et valorisés – dans la fabrication de nouveaux enrobés.

Depuis, ce recyclage valorisé augmente nettement, en raison de l'augmentation du prix des produits pétroliers (dont le bitume) et grâce aux investissements réalisés dans des postes d'enrobage.

L'estimation pour 2007 est que 30 % des anciens enrobés récupérés sont recyclés dans de nouveaux enrobés.

À titre de comparaison, la proportion d'enrobés recyclés en enrobés est proche de 100 % aux Pays-Bas, pays à peu près totalement dépourvu de granulats naturels, ce grâce à l'obligation légale d'inclure du recyclé dans chaque chantier d'enrobés. Aux États-Unis, la quantité totale d'enrobés enlevés annuellement des chaussées est d'environ 90 millions de tonnes. Un tiers, soit 30 millions de tonnes, est recyclé en enrobé (source : Federal Highway Administration).

1.2 Dispositions et études préalables

Deux grands cas de figure peuvent être distingués :

- les recyclages liés à de **grandes opérations de fraisage** ;
- le **recyclage « courant »** dans le cadre de la marche normale d'un poste d'enrobage.

1.2.1 Grandes opérations

Le « gisement » d'enrobés à recycler est, dans ce cas, bien identifié et homogène (origine unique, archives, carottages). Il est stocké à part en vue de sa réutilisation programmée.

À noter que les enrobés fraisés restent le plus souvent la propriété du maître d'ouvrage.

Une étude en laboratoire est effectuée avant chaque opération, afin d'évaluer l'état des vieux enrobés, le taux de recyclage, le type et le dosage du liant d'apport, etc., et de vérifier que les performances mécaniques du mélange final sont adéquates. Dans de telles opérations, le taux de recyclage est généralement fort (voir plus loin).

1.2.2 Recyclage courant

Les enrobés à recycler proviennent essentiellement de petits chantiers, soit après fraisage, soit après relevage de plaques d'enrobés, soit encore des surplus de production du poste.

Dans un premier temps, ils sont stockés tels quels. Ensuite, la pratique courante est d'utiliser un matériel forain, qui fait la tournée régionale des postes et concasse, ou émiette, les matériaux à recycler. Il s'agit souvent d'un concasseur mobile, parfois d'un matériel spécifique appelé « granulateur » (figure 1). Les « recyclats » résultant de cette opération sont criblés à une dimension maximale allant, selon le produit final prévu, de 10 à 20 mm (exceptionnellement 25 mm pour recyclage en assise). Les refus sont reconcassés.

Il est impératif que les enrobés récupérés, que ce soit avant ou après fractionnement, soient stockés proprement, sur des aires dédiées et protégées de tout mélange avec d'autres matériaux.

Avec de tels stocks d'enrobés d'origines diverses, l'échantillonnage représentatif pour établir une caractérisation et la dispersion de leurs caractéristiques est impossible.

Le taux de recyclage à partir de tels stocks d'enrobés constitués au jour le jour est donc toujours faible (cf. § 1.3).

La limitation du taux de recyclage minimise l'impact de l'hétérogénéité du gisement. Il n'y a alors pas d'étude spécifique de recyclage et l'on se borne à un suivi « basique » des caractéristiques des agrégats d'enrobés (voir en particulier § 1.3).

Remarque : La terminologie française, en particulier normative, attribue le nom d'« agrégats d'enrobés » aux enrobés provenant du fraisage, du concassage de plaques, de surplus ou déchets de production. Cette appellation est, à notre avis, malheureuse, car le terme « agrégat » est encore utilisé par certains au lieu de « granulat » et, surtout, en anglais, « granulat » se dit « *aggregate* ».

Les termes « recyclat » et « recyclés » sont aussi employés et nous semblent préférables.



(a) granulateur à rouleaux



(b) crible à disques

Figure 1 – Matériels forains de recyclage courant (crédit Fayat)

1.3 Recyclage à chaud en centrale

1.3.1 Taux de recyclage

La technique consiste à malaxer dans un poste à chaud des enrobés de récupération (« recyclats ») avec des granulats vierges et un liant bitumineux anhydre.

■ De manière empirique, on distingue :

- le recyclage à faible taux (10 à 25 % de recyclé) ;
- le recyclage à fort taux (30 à 65 %).

■ Quelques opérations de **recyclage à taux encore plus élevé** ont été réalisées, à titre d'expérience ou d'exploit, allant même jusqu'à 100 %. Bien entendu, elles ne sont viables qu'avec un stock d'enrobés récupérés très homogène et parfaitement identifié. Restant techniquement pointues, elles sont destinées à demeurer exceptionnelles.

■ Le **recyclage à fort taux** n'est envisageable que si l'on dispose d'un gisement d'enrobés récupérés homogène et bien identifié. De plus, il n'est possible qu'avec les configurations de postes suivantes (voir § 1.3.3) :

- postes discontinus :
 - soit équipés d'un sécheur rallongé, avec anneau de recyclage,
 - soit à tambours parallèles ;
- postes continus de type TSE :
 - soit équipés d'un anneau de recyclage,
 - soit comprenant un malaxeur à arbres en aval du tambour.

■ En pratique, le recyclage à fort taux concerne essentiellement des « grands chantiers ». Sur ce type de chantier, bien déterminé, les recyclats sont de provenance unique (souvent le chantier lui-même). Obtenus par fraisage, ils peuvent être réutilisés à bref délai, sans besoin de fragmentation supplémentaire (un simple criblage suffit).

1.3.2 Études de formulation. Consistance et méthodologie

Le principe de base est que l'enrobé avec recyclats doit satisfaire aux mêmes spécifications que l'enrobé neuf qui aurait été préconisé au même endroit.

Les études préalables comprennent toujours les mêmes phases successives : identification des constituants, détermination de la formule, épreuve de formulation.

■ Cas général

Comme on vient de le préciser, nous retrouvons ici les 3 phases :

– **identification des constituants** :

- quantification du gisement de recyclats,
- caractérisation des granulats naturels,
- caractérisation des recyclats (« agrégats ») : granularité, teneur et consistance du liant vieilli ;

– **mise au point de la formule** :

- détermination des % des constituants,
- choix et caractérisation du liant d'apport,
- choix du taux de recyclage ;

– **épreuve de formulation** :

- évaluation des performances du mélange prévu, afin de vérifier qu'elles sont conformes à la norme produit applicable.

■ Cas du recyclage à fort taux (30 à 65 %)

La méthodologie d'étude est la même : l'homogénéité des enrobés à recycler est vérifiée de manière particulièrement poussée.

La régénération du liant vieilli est un critère essentiel de la réussite de l'opération. Le choix du liant d'apport (bitume de viscosité adaptée ou liant spécial régénérant) revêt donc une importance particulière.

■ **Cas du recyclage « au fil de l'eau »** c'est-à-dire à partir de divers enrobés récupérés mélangés.

Le stock de recyclats (« agrégats d'enrobés ») est généralement hétérogène en termes de nature des granulats, de type et dosage des bitumes, de granulométries. Il n'est donc pas possible de se baser sur un échantillon représentatif du stock pour effectuer une étude de recyclage. Ce cas est de loin le plus fréquent ; il correspond à la majorité des tonnages recyclés.

Ce type de recyclage est rendu fiable par une double démarche :

- d'une part, on vérifie par des prélèvements réguliers que le stock de recyclats ne comporte pas d'anomalies par rapport à des caractéristiques moyennes représentatives des approvisionnements locaux, assorties évidemment de tolérances réalistes ;
- d'autre part, et surtout, le taux de recyclage est limité à un niveau faible. Les recherches du LCPC et de la profession ont démontré qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer d'étude préalable dès lors que le taux de recyclage n'excède pas 10 % dans les enrobés d'assise et de liaison [1].

Cette limite est aussi valable pour les couches de roulement, jusqu'à certains niveaux de trafic (voir § 1.3.4). La même approche est valable pour les graves-bitume avec un taux de recyclage maximal de 15 % [2].

En France, ces dispositions sont officialisées dans deux documents : la note de la Direction des routes du 03/10/2000 et la Circulaire ministérielle du 13/6/2001. Par ailleurs, la norme européenne EN 13108-8 (mars 2006) stipule que « ...lorsque l'on ajoute moins de 10 % pour les couches de roulement ou moins de 20 % pour les couches de liaison et d'assise d'agrégats d'enrobé, une fréquence d'échantillonnage peut être spécifiée par lot de 2 000 t et un seul échantillon par lot peut être testé... ».

1.3.3 Fabrication

Les possibilités de recyclage, et tout particulièrement son taux maximal, dépendent étroitement du type de poste d'enrobage.

1.3.3.1 Recyclage en poste discontinu

Les centrales de ce type (figure 2) comportent schématiquement une batterie de prédoseurs, un tambour sécheur, un élévateur, et un malaxeur à deux arbres à palettes, horizontaux et contrarotatifs.

Le recyclage implique de chauffer les recyclats (« agrégats ») sans brûler leur bitume et de les doser précisément dans le mélange final.

Diverses méthodes d'introduction sont utilisées (figure 3).

■ Introduction à partir d'un prédoseur

Les recyclats (minimum 5 %) sont envoyés vers le sécheur avec les granulats neufs. Cette méthode est très peu employée, car, s'il y a récupération de granulats, le vieux bitume est incinéré et donc perdu.

■ Introduction au pied de l'élévateur

Les recyclats sont ajoutés aux granulats neufs préalablement surchauffés dans le sécheur. Le séchage et le chauffage des enrobés recyclés s'effectuent par conduction dans l'élévateur et il est nécessaire d'allonger le cycle de fabrication.

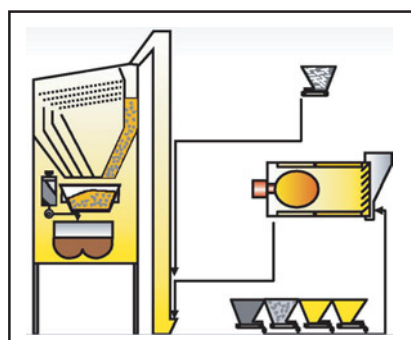
Cette méthode est simple et nécessite peu d'investissement. Toutefois, la surchauffe des granulats vierges (jusqu'à plus de



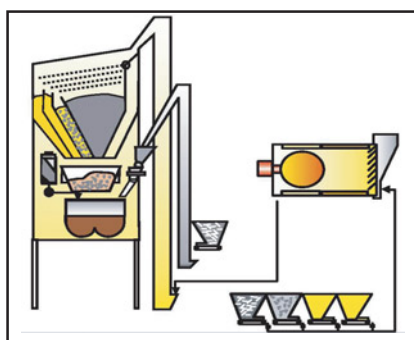
Figure 2 – Vue d'ensemble d'un poste à chaud discontinu (crédit Fayat)

200 °C) est très consommatrice d'énergie. De plus, cette surchauffe peut dégrader superficiellement certains types de granulats, produisant une quantité non négligeable d'ultrafines. Par ailleurs, son efficacité est vite limitée par l'humidité des recyclats et la vaporisation dans l'élévateur à chaud.

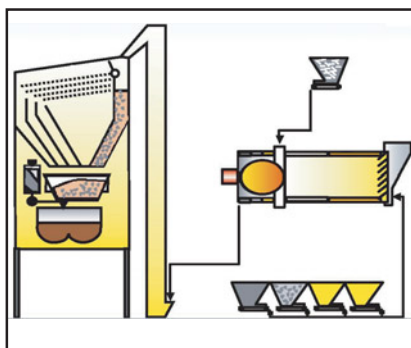
Le taux de recyclage maximum est de 10 % avec des recyclats secs. Il ne peut guère dépasser 5 % s'ils sont humides.



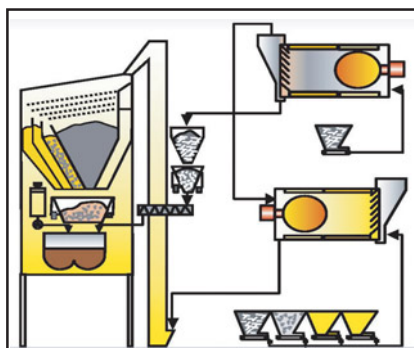
(a) au pied de l'élévateur (jusqu'à 10 %)



(b) dans le malaxeur (jusqu'à 25 %)



(c) dans l'anneau de recyclage (jusqu'à 35 %)



(d) dans le double tambour (jusqu'à 50 %)

Figure 3 – Les quatre méthodes de recyclage en poste discontinu (crédit Fayat)

Tableau 1 – Taux de recyclage maximal avec introduction dans le tambour

Dispositifs de séchage et d'introduction	Recyclats très humides	Recyclats secs
<ul style="list-style-type: none"> Sécheur standard. Tapis lanceur 	10 %	25 %
<ul style="list-style-type: none"> Sécheur rallongé. Tapis lanceur 	15 %	25 %
<ul style="list-style-type: none"> Sécheur rallongé. Anneau de recyclage 	20 %	35 %

■ Recyclage dans le tambour

Deux méthodes sont utilisables pour introduire les « agrégats » à recycler :

- par tapis lanceur installé en façade du sécheur ;
- par anneau de recyclage monté sur le sécheur (figure 4).

Le taux de recyclage maximum dépend du type d'installation (tableau 1).

■ Recyclage dans le malaxeur

Les « agrégats d'enrobés » à recycler sont introduits par l'intermédiaire d'une trémie peseuse qui débouche directement dans le malaxeur. Cette méthode permet un taux de recyclage allant jusqu'à 10 % avec des recyclats très humides, 20 % avec des recyclats secs.

Elle est parfois combinée avec une introduction de recyclats dans le tambour, auquel cas le taux de recyclage total peut atteindre 30 à 50 %, selon l'humidité des recyclés.

■ Cas particulier des postes équipés de deux tambours

Quelques centrales fixes sont équipées de deux tambours (figure 5). Les enrobés à recycler sont séchés et préchauffés vers 120 °C dans un tambour parallèle fonctionnant comme un TSE à écuicourant. Ils sont stockés dans un silo calorifugé, puis dosés et envoyés dans le malaxeur. Parallèlement, les granulats vierges sont surchauffés dans le tambour sécheur à contre-courant. Après dosage, ils sont envoyés dans le malaxeur et homogénéisés avec le recyclé et le bitume d'apport.

Dans ce type d'installation, le taux maximal de recyclage est de 35 à 40 %, lorsque les recyclats sont très humides. Il atteint 60 % avec des recyclats secs.

1.3.3.2 Recyclage en poste continu

Les postes d'enrobage continus modernes sont, en quasi-totalité, de type « Tambour-Sécheur-Enrobeur » (TSE). On distingue deux familles de TSE, selon que le séchage s'effectue en fonctionnement à écuicourant ou à contre-courant (figures 7 et 8). Les postes mobiles sont pratiquement tous des TSE (figure 6).

■ Recyclage en TSE à écuicourant

Les enrobés à recycler sont introduits dans la partie centrale du tambour par un anneau de recyclage (figure 7). Les recyclats sont d'abord dosés en continu, puis séchés et chauffés par les gaz chauds issus du brûleur et par les granulats vierges surchauffés dans la première partie du tube. Les recyclats sont protégés de la flamme du brûleur par l'écran que forment les granulats vierges grâce à la disposition des augets situés à l'intérieur du tube. Granulats vierges et recyclats sont alors homogénéisés en granulométrie et en température. Le mélange passe ensuite dans la zone de malaxage, où sont injectés le bitume et le *filler* d'apport.

Le taux maximal de recyclage dépend de l'humidité des constituants et du niveau de température visé pour le produit final ; il est de 20 à 30 %.

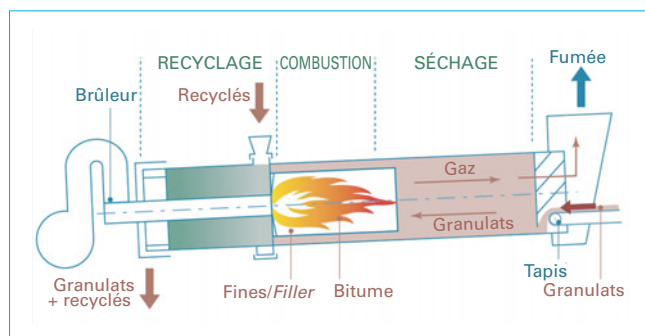


Figure 4 – Principe du recyclage dans le tambour d'un poste discontinu (crédit USIRF)

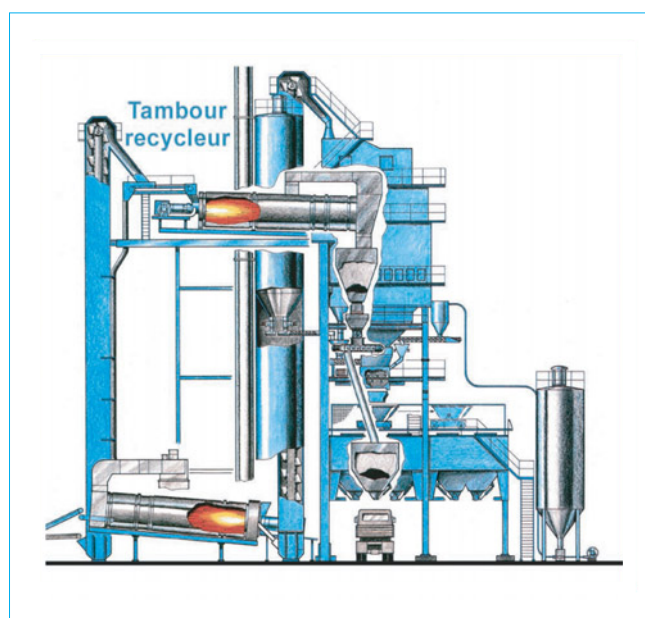


Figure 5 – Poste discontinu à tambours parallèles (crédit USIRF)



Figure 6 – Poste continu TSE avec anneau de recyclage (crédit Fayat)

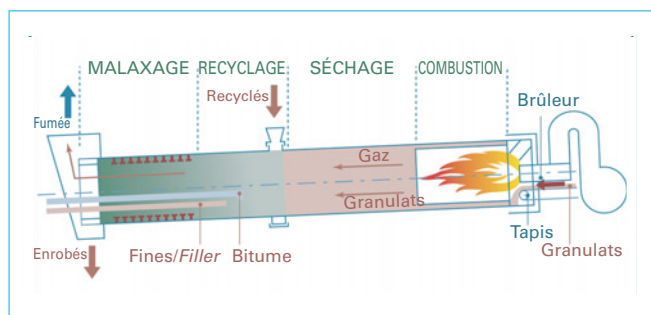


Figure 7 – Principe du poste continu TSE avec recyclage à équicourant (crédit USIRF)

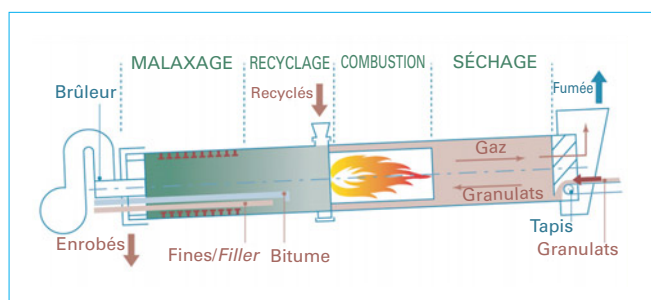


Figure 8 – Principe du poste continu TSE avec recyclage à contre-courant (crédit USIRF)

■ Recyclage en TSE à contre-courant

Les recyclats sont introduits par un anneau de recyclage positionné un peu plus loin que le milieu du tube (figure 8). Ils sont automatiquement protégés de la flamme du brûleur. Ils sont ensuite mélangés aux granulats vierges préalablement surchauffés dans la partie amont du tambour. Le bitume et le filler d'apport arrivent un peu en aval. L'ensemble passe alors dans la zone de malaxage.

Le taux maximal de recyclage varie de 30 à 50 % selon l'humidité des recyclats et la température du mélange final.

Le poste « à double tambour » est une variante de TSE à contre-courant, répandue, entre autres, aux États-Unis sous l'appellation de « Double Barrel ». La partie aval est constituée d'un cylindre fixe concentrique dans lequel arrivent les granulats vierges surchauffés et sont introduits les recyclats, le bitume, et le filler d'apport. La partie tournante est munie de bras avec palettes, qui effectuent un malaxage énergétique (figure 9).

■ Autres dispositifs de recyclage en continu

À travers le monde, divers types de matériels existent, qui sont des variantes et des compléments aux TSE « simples » :

- TSE équicourant suivi d'un malaxeur à arbres et palettes ;
- TSE équicourant à sortie centrale des gaz ;
- TS contre-courant suivi d'un tambour malaxeur séparé ;
- TS contre-courant prolongé par un malaxeur à arbres et palettes (figure 10).

1.3.4 Domaines d'emploi. Performances

Les préconisations d'emploi des enrobés contenant des recyclés varient d'un pays à l'autre. La norme européenne EN 13108-8 (mars 2006) se borne à indiquer une méthodologie pour classer les « agrégats d'enrobés ».

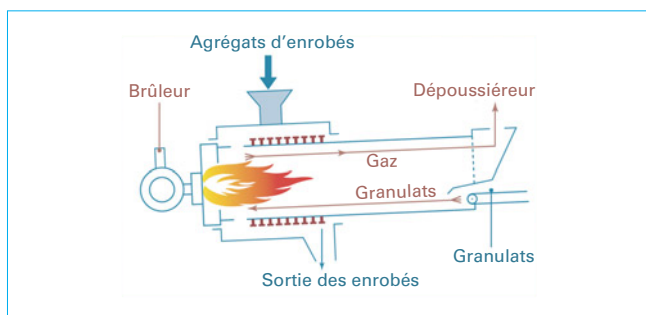


Figure 9 – Principe du poste continu double tambour à contre-courant (crédit USIRF)



Figure 10 – Vue d'un poste continu à tambour sécheur suivi d'un malaxeur à arbres (crédit Eiffage TP)

En France, le guide technique du Comité français pour les techniques routières (CFTR) « Utilisation des normes enrobés à chaud » de janvier 2008 [3] précise l'emploi possible des recyclats dans la formulation d'enrobés neufs (tableau 2)..

Les pourcentages de recyclats indiqués dans ce tableau peuvent être augmentés sous réserve d'une caractérisation précise ou d'une maîtrise de leurs provenance garantissant leur homogénéité et le respect des spécifications. En tout état de cause, il est nécessaire de connaître les caractéristiques des « agrégats » détaillées dans les tableaux 3, 4, 5 et 6, qui permettent de définir les catégories d'« agrégats d'enrobés » :

Des taux de recyclage plus élevés sont exceptionnellement pratiqués à l'occasion de grandes opérations de réhabilitation, en particulier sur autoroute, voie express, ou piste aéronautique. Elles comportent évidemment une reconnaissance précise du gisement à recycler, une étude de formulation poussée, et la mobilisation de matériels puissants et adaptés.

L'incorporation de recyclats dans les formules de béton bitumineux mince (BBM) ou très mince (BBTM) n'est autorisée que pour des cas particuliers, après étude spécifique poussée démontrant, entre autres, la conformité du produit final aux exigences de macrotexture et d'adhérence.

Le recyclage des bétons bitumineux drainants (BBDR) est tout à fait possible, mais pas en BBDR. Ils sont aisément recyclables dans des formulations de couche d'assise, en particulier d'enrobés à module élevé (EME) compte tenu du durcissement de leur liant.

Tableau 2 – Utilisation des recyclats (« agrégats d'enrobés »)

Usage dans la chaussée	Couche de roulement		0 %	10 % (1)		30 %	10 %	40 %
	Couche de liaison		10 %	20 %	30 %	40 %		
	Couche d'assise							
Composants de l'agrégat d'enrobé	Liant bitumineux	Teneur	TL _{NS}	TL ₂		TL ₁		
		Pénétrabilité ou TBA	B _{NS}		B ₂	B ₁		
	Granulat	Granularité	G _{NS}		G ₂		G ₁	
		Caractéristiques intrinsèques	R _{NS}			R ₁	R _{NS}	R ₁

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

Tableau 3 – Étendue de la teneur en liant (d'après [3])

Étendue de la teneur en liant	Catégorie
≤ 1 %	TL ₁
≤ 2 %	TL ₂
> 2 % ou non spécifié	TL _{NS}

D'une manière générale, le recul important dont on dispose permet d'affirmer que, moyennant le respect des recommandations ci-dessus, le recyclage à chaud en centrale produit des enrobés en tous points conformes aux spécifications applicables à l'enrobé neuf correspondant. Quant à leur comportement en place, il peut sous réserve être qualifié d'entièrement satisfaisant.

Il convient toutefois d'être attentif à l'adhérence des couches de roulement contenant des recyclés. Outre la double limitation d'emploi en termes d'intensité de trafic et de taux de recyclage, il faut être très prudent quant à l'emploi de recyclés dans les zones où les besoins d'adhérence sont très forts : zones de freinage, tracés sinueux, environnement humide, etc. Les qualités d'adhérence des granulats contenus dans le recyclat (angularité, micro-texture) doivent, dans ces cas, être soigneusement vérifiées avant de décider de leur réemploi éventuel.

À ce jour, les pratiques les plus courantes en France sont indiquées dans le tableau 7.

1.4 Recyclage à froid en centrale

1.4.1 Description générale

Les centrales d'enrobage à froid sont, en Europe comme en Amérique du Nord, nettement moins nombreuses que les postes d'enrobage à chaud. Le recyclage à froid en centrale est donc moins développé que celui à chaud.

Tableau 4 – Pénétrabilité minimale et TBA maximale du liant de l'agrégat et étendue (d'après [3])

Pénétrabilité (en 1/10 mm)	TBA (en °C)	Fréquence des essais	Catégorie
Minimale = 5 et étendue ≤ 15	Maximale = 77 et étendue ≤ 8	1 essai pour 1 000 tonnes avec un minimum de 5 essais	B ₁
Minimale = 5	Maximale = 77	1 essai pour 1 000 tonnes avec un minimum de 5 essais	B ₂
À déclarer	À déclarer	Non spécifiée	B _{NS}

Tableau 5 – Homogénéité granulométrique des « agrégats d'enrobés » (d'après [3])

% passant à 1,4 D	% passant à D	% passant à 2 mm	% passant à 0,063 mm	Catégorie
Vsi 99	Li 85 Ls 99 e 10	e 15	e 4	G ₁
Vsi 99	Li 80 Ls 99 e 15	e 20	e 6	G ₂
Non spécifiée	Non spécifiée	Non spécifiée	Non spécifiée	G _{NS}

Note : les définitions de D, Vsi, Li, Ls et e sont celles de la norme XP P 18-545.

Tableau 6 – Caractéristiques intrinsèques et angularité exigés des granulats contenus dans des « agrégats d'enrobés » (d'après [3])

Catégorie des granulats	Fréquence des essais	Catégorie
Code A ou B et code Ang 1 pour les gravillons et sables	1 par lot	R ₁
Code C ou non caractérisé	Non spécifiée	R _{NS}



Figure 11 – Centrale d'enrobage à froid ultramobile (crédit Wirtgen)

Le recyclage à froid en centrale s'effectue majoritairement à l'émulsion de bitume. Compte tenu de sa relative rusticité, la mousse de bitume est surtout utilisée pour des retraitements en place ; elle sera abordée dans l'article [C 5 622].

Les centrales d'enrobage à froid sont, pour la plupart, des matériels faciles à déplacer. Certaines sont très mobiles, les plus simples ne nécessitant que deux semi-remorques pour leur transfert (figure 11). La majorité des recyclages à froid en centrale correspond donc à des opérations de taille suffisante pour justifier l'amenée d'une centrale tout près du chantier et ainsi minimiser les distances de transport.

1.4.2 Taux de recyclage

■ Les (relativement) **grosses opérations de fraisage et recyclage à froid** comportent des taux de recyclage élevés. Le taux de 100 % est assez souvent pratiqué, deux conditions devant être remplies pour le succès du recyclage :

- les recyclats doivent être soigneusement fractionnés, et criblés assez fins (à 10 ou 14 mm par exemple) ;
- la distance séparant la centrale et la mise en œuvre doit être courte, pour que le mélange reste suffisamment maniable sur le chantier.

Si nécessaire, un correcteur granulométrique, généralement un sable, est ajouté dans une proportion qui peut aller de 10 à 30 %, ce qui donne encore un taux de recyclage d'au moins 70 %. Ces recyclages à fort taux correspondent à des procédés d'entreprise [4].

■ Il est également possible d'incorporer, **en production courante**, une quantité limitée de recyclats dans un mélange à l'émulsion. Des recherches récentes ont, par exemple, montré que l'on peut mettre jusqu'à 15 % de recyclats « courants » (provenant d'enrobés à chaud) dans une grave-émulsion sans modifier sensiblement son comportement.

■ **Plusieurs produits d'entreprise**, essentiellement des bétons bitumineux de roulement et des enrobés de reprofilage/rechargement, peuvent recevoir une proportion « moyenne » de recyclats (20 à 35 %). Dans ces cas, les recyclats sont d'origine sélectionnée garantissant leur homogénéité.

1.4.3 Études de formulation. Consistance et méthodologie

Le déroulement d'une étude de recyclage à l'émulsion est schématisé par le diagramme de la figure 12 [5].

■ **L'homogénéité du gisement à recycler est un facteur critique** pour la réussite d'un recyclage à fort ou moyen taux. Le gisement est, bien entendu, caractérisé par des valeurs moyennes et extrêmes de ses caractéristiques.

Le mélange final devant être mis en œuvre à température ambiante, **le liant d'apport a un rôle essentiel dans la régénération du vieux bitume** et l'obtention d'un niveau de maniabilité convenable. Le choix du liant d'apport, en termes de viscosité et de composition est donc un point-clé.

À titre indicatif, la plupart des caractéristiques des liants vieilliss étudiés se situent dans les limites ci-après :

- pénétrabilité à 25 °C : 8 à 35 dmm ;
- température de ramollissement Bille-Anneau (TBA) : 55 à 75 °C ;
- teneur en asphaltènes : 16 à 25 %.

Tableau 7 – Pratique française. Taux de recyclage maximal en centrale à chaud

Composants du recyclat	Liant bitumeux	Teneur	TL _{NS}	TL ₂		TL ₁			
		Pénétrabilité ou TBA	B _{NS}		B ₂	B ₁			
	Granulats	Granularité	G _{NS}		G ₂		G ₁		
		Caractéristiques intrinsèques	R _{NS}			R ₁	R _{NS}	R ₁	
Usage dans la chaussée	Couche de roulement		0	10		(1)	30	10 (1)	40
	Couche de liaison		10	20		30	40		
	Couche d'assise								

(1) Si la teneur en liant moyenne de l'agrégat est supérieure à 5,5 ppc, alors on peut introduire jusqu'à 10 % d'agrégat dans l'enrobé recyclé même si les caractéristiques intrinsèques des granulats ne sont pas connues (R_{NS}).

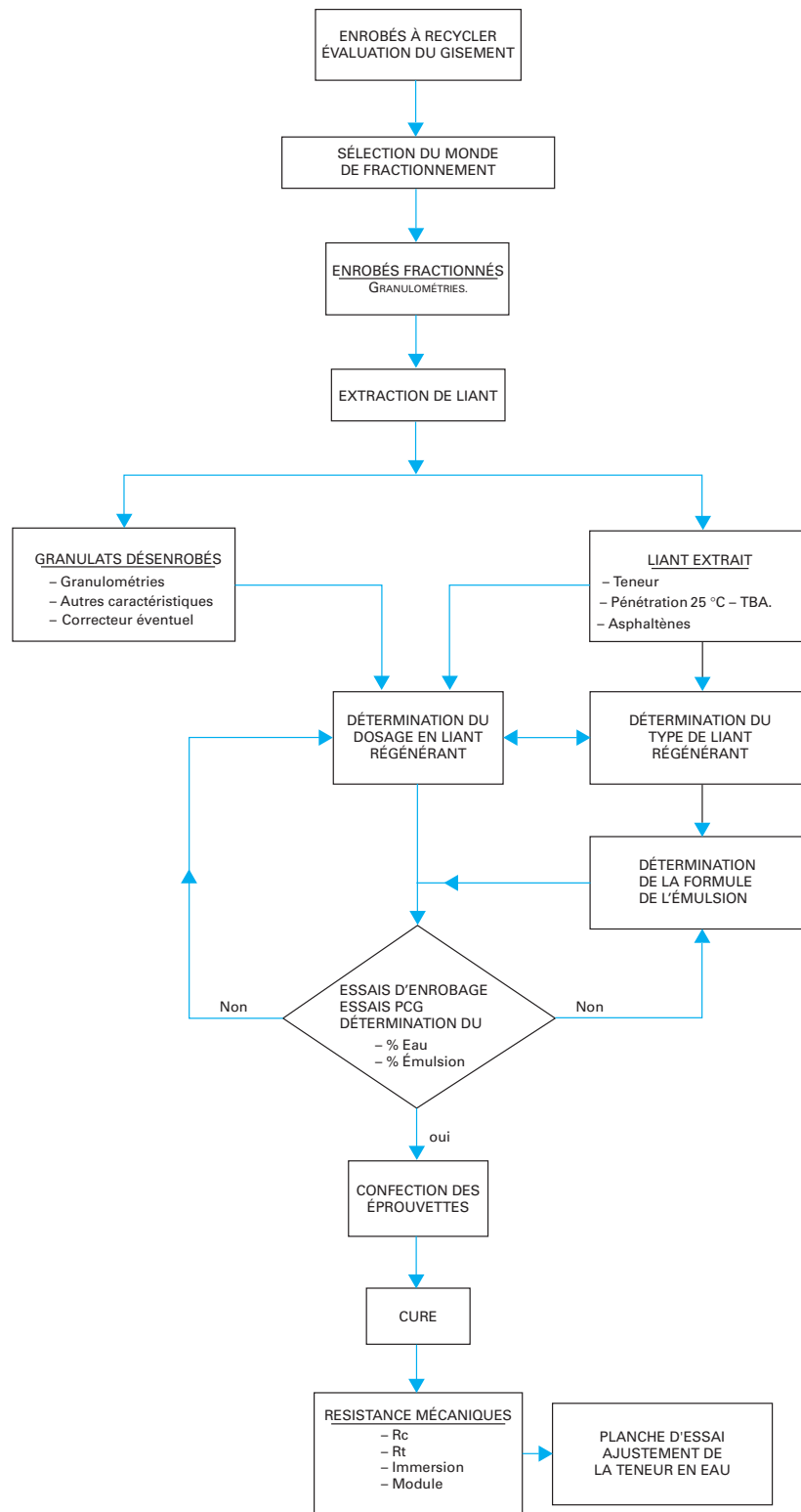


Figure 12 – Diagramme d’une étude de recyclage à l’émulsion



(a) prédoseurs d'une centrale à froid



(b) introduction de recyclats

Figure 13 – Parcours des recyclats d'enrobés jusqu'en trémie doseuse (crédits USIRF et SCREG Ouest)



Figure 14 – Centrale de fabrication de grave-émulsion (crédit SCREG Ouest)

Selon l'état du vieux bitume, le type, et la destination du produit final visé, le bitume de base de l'émulsion est, soit un bitume mou, soit un véritable liant régénérant, recomposé à partir de coupes pétrolières spécifiques, soit un bitume à fluxant réactif.

L'émulsion est, quant à elle, formulée en fonction de la granulométrie de l'état de surface et de la réactivité des minéraux, dont les particules fines du matériau à traiter (critères : dispersion du liant, enrobage correct et vitesse de rupture compatible avec l'exécution des travaux).



Figure 15 – Application de GE avec recyclats (crédit SCREG Sud-Ouest)

■ **Les objectifs de performances attendues** du produit final dépendent du type d'opération. **En règle générale, on demande des performances au moins égales à celles de l'enrobé à l'émulsion neuf équivalent.**

Pour certains recyclages à fort taux, on applique des spécifications particulières, fonctions des données locales. **Le retour d'expérience est tout à fait positif, les performances mécaniques étant fréquemment supérieures à celles du produit neuf équivalent.** Un point critique est toutefois l'obtention de la maniabilité nécessaire pendant un délai suffisant.

■ **Les résultats d'étude disponibles** en matière de recyclage à l'émulsion se situent dans les fourchettes suivantes [5] :

- teneur en liant vieilli : 3,5 à 6 % ;
- demande en émulsion : 2 à 3 % ;
- dosage en liant résiduel total : 4,5 à 6,5 % ;
- compacité Duriez-LCPC : 86 à 93 % ;
- résistance en compression simple à 18 °C (MPa) :
 - après 7 jours à 18 °C : 4,5 à 7,5,
 - après 14 jours à 18 °C : 5,0 à 8,0,
 - après 28 jours à 18 °C : 6,0 à 10,0 ;
- rapport immersion-compression (après 7 jours à l'air, puis 7 jours dans l'eau à 18 °C) : 0,70 à 0,75.

Ces derniers chiffres dénotent une très bonne tenue à l'eau, qui s'explique par le fait que la matière première est un matériau déjà enrobé dont le liant est devenu très visqueux.

Il est à noter que les spécifications concernant les enrobés à l'émulsion sont, à la date de la présente rédaction, relativement succinctes. La profession routière (Union des Syndicats de l'industrie routière de France) mène actuellement des recherches conjointement avec le réseau scientifique et technique de l'État, afin de préparer un ensemble cohérent de spécifications performantielles. En tout état de cause, la formulation et la fabrication des émulsions, les procédés de fabrication des enrobés à l'émulsion, etc., relèvent du savoir-faire des entreprises. Les principaux groupes routiers continuent de mener des programmes de recherche-développement conséquents dans ces domaines, recyclage inclus.

1.4.4 Fabrication et mise en œuvre

La préparation et le stockage des recyclats d'enrobés sont les mêmes que dans le cas d'un recyclage à chaud. Une fois fractionnés et criblés, les recyclats d'enrobés sont mis en trémie doseuse (figure 13) et introduits dans le malaxeur continu (figure 14).

L'application se fait généralement au finisseur (figure 15) ou à la niveleuse pour certains reprofilages.



Figure 16 – Mise en œuvre de béton bitumineux à l'émulsion à fort taux de recyclats (crédit Eiffage TP)



Figure 17 – Compactage d'un BBE avec recyclats (crédit SCREG Ouest)

Le compactage (figure 16) fait appel à des rouleaux vibrants, parfois en combinaison avec des compacteurs à pneumatiques lourds. Le compactage de ces mélanges (figure 17) requiert une énergie élevée. L'ajustement de la teneur en eau est un point important. Une planche d'essai en début de chantier permet de l'optimiser, en fonction de la teneur en eau réelle des recyclats et des conditions climatiques.

1.4.5 Domaines d'emploi. Performances

■ **En grave-émulsion** de rechargement/reprofilage, le recyclage à faible taux (15 % maximum) a donné lieu à quelques chantiers. À ce jour, sous trafic léger ou moyen, le comportement est satisfaisant. Le domaine d'emploi devrait donc être le même que celui des graves-émulsions neuves.

■ **En couche de roulement mince** (3 à 5 cm), des bétons bitumineux contenant 20 à 30 % de recyclats sélectionnés ont été appliqués à partir des années 2000, avec des résultats positifs. Ces produits d'entreprise sont *a priori* utilisables sans restriction jusqu'aux trafics T2 inclus et sous réserve d'étude spécifique en T1.

■ **Un procédé d'entreprise particulier** permet de formuler des mélanges constitués de 100 % de recyclats [4]. Le liant d'apport est une émulsion d'un bitume contenant un fluxant réactif d'origine végétale. Dans un premier temps, ce fluxant ramollit le liant (d'où maniabilité), puis il durcit progressivement. Les applications vont de l'enrobé de reprofilage (2-10 cm) aux couches de roulement mince (3-5 cm) et épaisse (6-8 cm), sous trafic faible ou moyen (\leq T2).

■ **Des mélanges à l'émulsion** avec un taux de recyclage élevé (jusqu'à 100 %) en couche de base ou de fondation existent pour

constituer des chaussées soumises à trafic moyen ou lourd. Avec le recul, il apparaît nécessaire de prévoir les couvertures suivantes :

- jusqu'au trafic T2 : mélange utilisé en couche de roulement ou, si les conditions climatiques ou géométriques sont défavorables, sous un revêtement mince ;
- jusqu'au trafic T1 : utilisable en couche de base ou de liaison, sous une épaisseur de béton bitumineux à chaud à dimensionner ;
- jusqu'au trafic T0 : utilisable en couche d'assise, sous une épaisseur suffisante d'enrobés à chaud.

■ **Les points communs de tous ces produits** sont les teneurs en vides assez importantes, l'absence d'orniérage, une très bonne tenue à l'eau. En tout état de cause, l'exploration de tous les domaines d'emploi possibles est loin d'être terminée.

En termes de développement durable, les recyclages à froid ont, par rapport aux recyclages à chaud, un avantage certain en termes d'énergie et de production de CO₂ : pas de chauffage des recyclats, pas d'évaporation de l'eau. Rappelons que la chaleur latente de l'eau est considérable : 2 250 MJ/t (méga-joule par tonne).

L'absence de fumées et brouillard sur chantier est, de plus, un facteur favorable pour la sécurité.

Enfin, il convient de noter que diverses recherches sont en cours afin de mettre point de nouvelles techniques de recyclage à froid ou d'améliorer celles qui existent.

1.5 Recyclage à tiède

Dans la foulée de leur développement depuis le début des années 2000, plusieurs techniques d'enrobés à tiède ont commencé à être étendues au recyclage. À ce jour, toutes les technologies à tiède n'ont pas été expérimentées en recyclage et ce qui suit ne doit en aucune manière être considéré comme exhaustif.

■ **Au moins les principes suivants ont été testés en recyclage à tiède :**

- bitume d'apport plastifié par adjonction de paraffine (cire) ;
- incorporation de zéolithes dans le mélange (les zéolithes sont des aluminosilicates hydratés, qui libèrent leur eau lorsqu'ils sont chauffés) ;
- tiédissement du mélange à l'émulsion de bitume. Ce dernier procédé (figure 18) est particulièrement économe en énergie, et donc en gaz à effet de serre (on tiédit seulement aux alentours de 60 °C).

■ **Les premiers résultats de ces procédés « à tiède »** sont prometteurs, mais il est encore trop tôt pour tirer un bilan et évaluer les comportements *in situ* à moyen et long terme. On peut s'attendre à ce que le recyclage à tiède d'enrobés permette :

- par rapport au recyclage à chaud, de diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre ;
- par rapport au recyclage à froid, d'obtenir une meilleure maniabilité et une diffusion plus rapide du liant d'apport dans le vieux bitume.

1.6 Recyclage au liant hydraulique

Il peut paraître paradoxal de recycler des enrobés en les mélangeant avec un liant hydraulique, la logique élémentaire voulant que le bitume qu'ils contiennent soit valorisé en tant que tel. Néanmoins, diverses recherches et études ont montré que ce type de traitement donne des résultats tout à fait intéressants. Ainsi, des formulations de « grave-ciment » constituées de recyclats d'enrobés, avec éventuellement un sable correcteur et ajout de ciment ou de liant hydraulique routier se caractérisent par :

- un module de rigidité très sensiblement moindre (autour de 50 %) que celui d'une grave-ciment classique ;



(a) tube tiédisseur



(b) enrobés tièdes à l'émulsion

Figure 18 – Procédé de tiédissement à l'émulsion de bitume
(crédit SCREG Ouest)



Figure 19 – Centrale de malaxage et stock de fraisats
(crédit SCREG Est)

- une résistance en traction élevée, du même ordre de grandeur que celle d'une grave-ciment ;
- des déformations admissibles bien plus élevées (jusqu'à 4 fois plus).

En matière de dimensionnement, ces « recyclats-ciment » ont donc un indice de qualité élastique (IQE) nettement plus favorable que les graves traitées habituelles. Par ailleurs, ces matériaux présentent d'excellentes résistances à l'orniérage et au poinçonnement.



Figure 20 – Compactage et état final de fraisats traités au liant hydraulique routier (crédit SCREG Est)

Si l'usage de ce type de matériau reste marginal, un certain nombre de chantiers de taille normale ont été réalisés. Les premiers remontent au début des années 1980. Le comportement en est entièrement satisfaisant.

Les applications, concrétisées ou possibles, sont variées :

- couches de fondation ou de base (exemple de formulation : 96 % recyclats + 4 % ciment – module de rigidité ~ 10.000 MPa (déformation relative à la rupture en traction ~ $200 \cdot 10^{-6}$ – IQE ~ 19) ;
- élargissements de chaussée ;
- aires de stationnement poids lourds (exemple : 65 % fraisats 0/10 + 31 % sable correcteur + 4 % liant hydraulique routier – module de rigidité ~ 9 000 MPa – résistance en traction directe : Rtd ~ 0,75 MPa – revêtement 6 cm de béton bitumineux) ;
- sols industriels rustiques (zones de stockage, plate-formes diverses) avec ou sans revêtement.

Selon les usages visés, les recyclats sont criblés à une dimension maximale allant de 14 à 30 mm. La fabrication s'effectue en centrale de blanc classique, fixe ou mobile, les recyclats étant dosés et introduits via un prédoseur (figure 19). La mise en œuvre est similaire à celle des graves traitées (figure 20).

1.7 Recyclage des enrobés spéciaux

Le terme « enrobés spéciaux » recouvre à la fois les enrobés contenant un additif solide (fibres, polyéthylène, asphaltite, etc.) et ceux formulés avec un liant modifié (bitume-polymère essentiellement). Ces enrobés spéciaux se sont beaucoup développés depuis les années 1980. Les plus anciens ont déjà fait l'objet d'opérations de recyclage.

Les études réalisées ont prouvé que tous ces enrobés spéciaux sont recyclables. Ils sont généralement recyclés comme des enrobés ordinaires. Quelques rares opérations spécifiques, ciblées et de taille suffisante, ont tenu compte des caractéristiques particulières du gisement et cherché à en tirer parti.

À noter que, lors de la mise au point d'un nouveau produit, sa recyclabilité est systématiquement étudiée... et généralement prouvée.

1.8 Rôle du bitume recyclé

Le recyclage des enrobés amène à se poser la question : « Le vieux bitume peut-il être considéré comme jouant encore le rôle d'un liant dans le nouveau mélange ? » La réponse est, en résumé : « Oui, mais jamais en totalité. »

D'une part, le bitume de recyclat est toujours un bitume vieilli, devenu durci et moins adhésif, en particulier par oxydation. D'autre part, l'amalgame initial entre liant d'apport et bitume recyclé est au mieux partiel à chaud ; il n'est que très superficiel à froid.

Des recherches, faisant appel à des techniques d'investigation sophistiquées, comme les traceurs radioactifs, montrent que se produit ensuite une diffusion lente (car à température ambiante) du liant d'apport (du moins de ses parties légères) dans le vieux bitume. La vitesse de diffusion et son amplitude dépendent beaucoup de la nature du liant d'apport.

En pratique, la quantité maximale de liant d'apport qu'il est possible d'incorporer sans produire un mélange excessivement riche est clairement limitée. Par exemple, pour le cas extrême d'un recyclage à froid au taux de 100 %, le dosage optimal en liant d'apport se situe dans la fourchette 1,5-3 %, alors que l'enrobé neuf équivalait nécessiterait environ 2 points de plus. Ceci démontre que les recyclats ne peuvent pas être simplement considérés comme une « roche noire ».

Par ailleurs, l'intérêt de régénérer le vieux bitume, de lui redonner souplesse et adhésivité, a conduit au développement de liants véritablement régénérants. Il s'agit de mélanges reconstitués spécialement. Ils contiennent une forte proportion de fractions légères et peu, voire pas du tout, d'asphaltes. Leur finalité est, en effet, de redonner une composition équilibrée au mélange de liants final. Certains sont à base de coupes pétrolières modifiées chimiquement ; d'autres, plus récents, font appel à des produits d'origine végétale.

2. Recyclage de matériaux blancs

Tous les matériaux de chaussée « blancs », à savoir les graves non traitées, les graves et sables traités (au ciment, au liant hydraulique routier, au laitier, etc.) et les bétons de ciment sont recyclables **sous forme de granulats**.

2.1 Préparation et caractérisation

Le recyclage de grave non traitée (GNT) en centrale est rarissime, le retraitement en place étant bien plus économique.

Celui des graves ou sables traités au liant hydraulique est assez peu fréquent. L'enlèvement du matériau peut se faire de deux manières : soit par fracturation, reprises des dalles au chargeur ou à la pelle, puis concassage, soit par fraisage. Le concassage, comme le fraisage, produisent une importante quantité de fines avec ces matériaux. Le concassage produit un O/D très creux, que l'on écrête, selon les cas, à 14, 20 ou 30 mm.

Le béton de ciment est fracturé en place (à la guillotine ou au pilon). Les morceaux de dalles sont ensuite concassés et criblés en plusieurs fractions granulométriques, par exemple, celles utilisées pour la fabrication des bétons routiers (dimension maximale 20 ou 40 mm) si leur réutilisation est prévue dans ce type de matériau.

Les granulats ainsi obtenus sont caractérisés par leur :

- granulométrie ;
- propreté ;
- aplatissement ;
- angularité ;
- résistance à la fragmentation (Los Angeles) ;
- résistance à l'usure (Micro-Deval) ;
- éventuellement, sensibilité au gel/dégel.

2.2 Recyclage dans un matériau non traité

Les granulats recyclés sont introduits de manière classique, par prédoseurs dans une centrale de blanc, où ils sont mélangés avec des granulats vierges et de l'eau, pour produire une grave reconstituée humidifiée (GRH).

2.3 Recyclage dans un matériau hydraulique

L'étude de formulation est menée de la même façon que pour un matériau hydraulique constitué à partir de granulats vierges, avec détermination des mêmes propriétés. L'expérience montre que les granulats récupérés à partir d'un matériau hydraulique sont généralement très frottants, ce qui influe fortement sur la maniabilité du mélange et conduit à limiter le taux de recyclage. Par ailleurs, on observe souvent qu'une petite réactivité hydraulique subsiste dans les granulats recyclés, ce qui favorise les liaisons avec le nouveau liant hydraulique.

Les opérations de recyclage d'hydraulique en hydraulique ne sont pas fréquentes. Les plus notables sont des opérations de recyclage à l'occasion de la reconstruction de chaussées en béton, l'ancien béton concassé entrant dans la composition de la nouvelle couche de fondation et/ou des nouvelles bandes d'arrêt d'urgence en béton.

Remarque : Pour ce qui est des bétons de ciment, ce qui précède concerne exclusivement les bétons routiers. Des bétons de démolition du génie civil, voire du bâtiment, sont utilisés dans la composition de matériaux subnormaux, type GNT ou GRH, pour voirie secondaire.

3. Conclusion

Le recyclage en centrale est applicable à tous les types de matériaux de chaussées. Les techniques de recyclage au bitume chaud sont parvenues à maturité. Les enrobés contenant une part de recyclats se comportent de manière entièrement satisfaisante, y compris à long terme.

Les recyclages à l'émulsion donnent aussi d'excellents résultats, mais cette filière est encore en phase d'évolution et d'innovations.

Les recyclages à tiède, encore récents, constituent une voie d'avenir, qu'il conviendra de suivre avec attention.

Les recyclages au liant hydraulique ne doivent pas être oubliés, car susceptibles de fournir des solutions spécifiques intéressantes.

Enfin, l'intérêt du recyclage ne fera que se renforcer à l'avenir, avec l'enchérissement des matières premières et l'attention croissante (heureusement) portée à la présentation de l'environnement.