

Recyclage et retraitement en place des matériaux de chaussée

par Jean-Pierre SERFASS
Ingénieur civil des Mines. Consultant

1.	Avantages spécifiques et perspectives	C 5 622 - 2
1.1	Avantages spécifiques du recyclage/retraitement en place	— 2
1.2	Perspectives.....	— 2
2.	Recyclage en place d'enrobés	— 2
2.1	Recyclage en place à chaud (techniques « thermo-R »)	— 2
2.2	Recyclage en place à froid d'enrobés.....	— 5
3.	Retraitement de chaussée	— 6
3.1	Études préalables. Faisabilité. Choix d'une technique	— 6
3.2	Matériels de retraitement	— 8
3.3	Retraitement à l'émulsion	— 11
3.4	Retraitement à la mousse de bitume	— 14
3.5	Retraitement au liant hydraulique	— 15
3.6	Retraitement mixte (hydraulique + bitumineux)	— 19
4.	Conclusion.....	— 20
	Pour en savoir plus	Doc. C 5 622

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.

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.

Le recyclage en place est globalement moins « industriel que le recyclage en centrale : une certaine hétérogénéité des matériaux peut subsister, la qualité du malaxage est généralement moindre. Par contre, il est particulièrement bénéfique en termes de développement durable. Enfin, comme on va le voir, la palette des machines de traitement en place est très large : elle va de l'engin rustique à la machine multifonctions très sophistiquée.

Ce dossier complète le [C 5 620] traitant du recyclage en centrale.

1. Avantages spécifiques et perspectives

1.1 Avantages spécifiques du recyclage/retraitement en place

Outre tous les avantages du recyclage (économies de ressources, d'espaces naturels, d'énergie, réduction des émissions), le fait de réaliser l'opération en place amène des bénéfices supplémentaires :

- grandes économies de transport ;
- suppression des opérations intermédiaires de stockage et de reprise des recyclats ;
- réutilisation intégrale du matériau en place.

1.2 Perspectives

Les retraitements en place existent depuis longtemps. Au Royaume-Uni, par exemple, le « *Retread Process* » à l'émulsion, qui signifie littéralement « rechapage », remonte aux années 1940.

Les techniques de retraitement en place ont connu un développement inégal, selon les pays et aussi selon les procédés. Ainsi, les retraitements de chaussée sont longtemps restés considérés comme une technique rustique, confinée aux routes secondaires en zones rurales. Cela se justifiait par les performances limitées des matériels disponibles. Or, les machines de malaxage ont beaucoup évolué depuis les années 1990, tant en puissance, qu'en précision de travail. Les plus performantes d'entre elles peuvent opérer sur d'importantes épaisseurs et fournir une qualité de malaxage qui n'est plus très éloignée de celle des centrales mobiles.

Ces évolutions, jointes à l'enchérissement des ressources et à la nécessité de préserver l'environnement, donnent aux recyclages/retraitements en place un regain d'intérêt.

2. Recyclage en place d'enrobés

2.1 Recyclage en place à chaud (techniques « thermo-R »)

Les techniques présentées ci-après comportent des points communs :

- chauffage progressif par le haut des enrobés à traiter ;
- scarification ;
- remise en place.

2.1.1 Thermoreprofilage

Il s'agit de la remise au profil d'une ou plusieurs voies de chaussée bitumineuse par chauffage, scarification, mise en forme et recompactage sans enlèvement de matériau, ni apport d'enrobé neuf ou d'additif.

Ce procédé ne modifie pas la composition de l'enrobé en place, hormis un léger vieillissement du bitume, consécutif à son chauffage en film mince.

Le chauffage est assuré par une suite de préchauffeuses à panneaux radiants, réglés de manière à atteindre 120-130 °C dans l'épaisseur à traiter. Le dernier panneau radiant fait partie d'une machine spéciale, qui scarifie et remet en forme avec une table de type finisseur. Le reconditionnement intéresse une profondeur de 3 à 6 cm selon les chantiers.

Le thermoreprofilage peut être employé sur chaussée sans défaut de structure, pour corriger des défauts d'uni ou un léger orniérage de couche de surface, dû à de l'usure ou du post-compactage.

Ce procédé ne modifiant pas la composition de la couche de surface, il n'est efficace que si l'enrobé à traiter ne présente ni défaut sérieux de formulation, ni vieillissement excessif.

2.1.2 Thermorégénération

Il s'agit de la régénération de la surface et de la remise au profil d'une chaussée bitumineuse par :

- chauffage ;
- scarification sur une profondeur plus importante que l'épaisseur enlevée ;
- enlèvement d'une partie du matériau décohésionné ;
- réglage ;
- mise en place d'une couche d'enrobé neuf ;
- compactage de l'ensemble.

Le chauffage est assuré par une suite de panneaux radiants. Une machine spéciale assure l'ensemble des opérations entre le chauffage et le compactage. La profondeur scarifiée se situe entre 3 et 5 cm, l'épaisseur d'enrobé entre 2 et 3 cm. Ce procédé est – ou plutôt était – employé pour soit :

- restituer les qualités d'une et d'adhérence à une couche de roulement usée ;
- reprendre un orniérage d'amplitude limitée ;
- éliminer une interface décollée ;
- encore, remplacer un enrobé de surface défectueux.

En fait, ce procédé n'est plus utilisé en raison de la multiplication et des performances des fraiseuses à froid, matériels plus simples et plus sûrs.

2.1.3 Thermorecyclage

2.1.3.1 Description

Il s'agit du recyclage en place par chauffage, décohésionnement, malaxage de l'enrobé ancien avec les correcteurs nécessaires (liant d'apport, granulats), les additifs éventuels (fibres, polymère, etc.) et remise en œuvre du mélange [1].

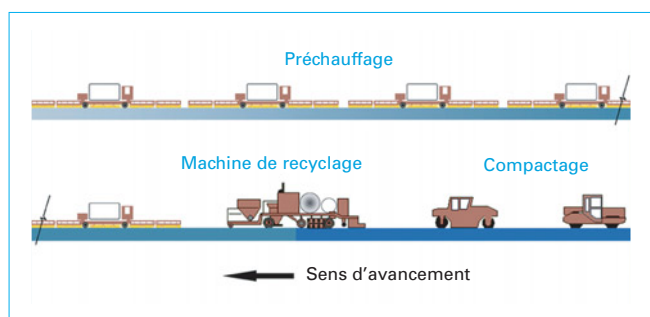


Figure 1 - Atelier-type de thermorecyclage (crédit USIRF)



Figure 2 - Ensemble de préchauffeuses à panneaux radiants (crédit Wirtgen)

Toutes les opérations se déroulent en une seule intervention d'un atelier spécialisé. L'atelier-type (figure 1) comprend une suite de préchauffeuses à panneaux radiants et une machine de scarification – malaxage – épandage du matériau recyclé. Un atelier de compactage vient ensuite.

■ Le **chauffage des enrobés en place** est effectué par un ensemble de préchauffeuses à panneaux radiants en infrarouge (figure 2). Le nombre de préchauffeuses et leur vitesse d'avancement sont choisis pour assurer une élévation de température jusqu'à 100-150 °C dans la profondeur à traiter (voir plus loin).

La surface de chauffe est au minimum de 200 m². Elle doit être portée jusqu'à 300 m² dans les cas les plus difficiles (profondeur importante et conditions météorologiques défavorables). La vitesse d'avancement varie en pratique de 2 à 6 m/min.

■ Le **décohésionnement de l'enrobé ramolli** est assuré par un ou plusieurs tambours/fraises quelque peu différents d'une machine à l'autre (voir figures 3 et 4). Divers ajouts solides peuvent être incorporés par la machine :

- correcteur granulométrique (gravillons prélaqués, sable) ;
- enrobé d'apport, avant ou après le malaxeur (figure 5) ;
- additif solide améliorant la tenue du mélange final (fibres, polyéthylène, etc.).

Un malaxeur à arbres, soit verticaux, soit horizontaux, dans lequel est pulvérisé le liant d'apport, homogénéise l'ensemble.

Le réglage et le précompactage du mélange recyclé est assuré par une table de finisseur. La largeur utile peut atteindre 4 m. Avec des matériels à largeur variable, elle peut aller de 2,5 à 4 m.

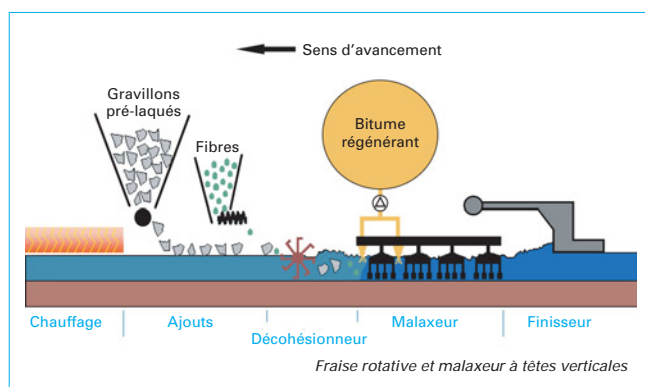


Figure 3 - Principe du thermorecyclage avec ajouts et malaxeur à arbres verticaux (crédit USIRF)

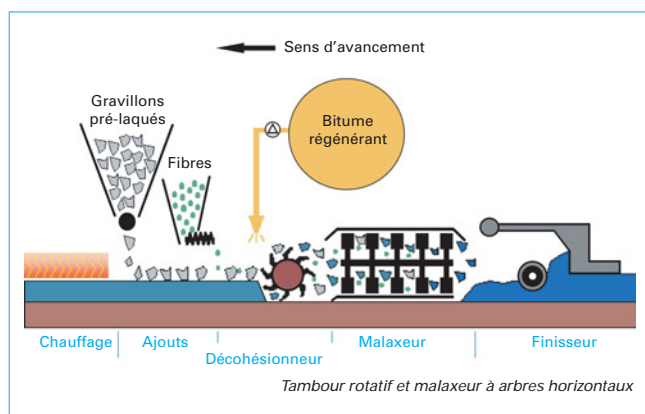


Figure 4 - Principe du thermorecyclage avec ajouts et malaxeur à arbres horizontaux (crédit USIRF)

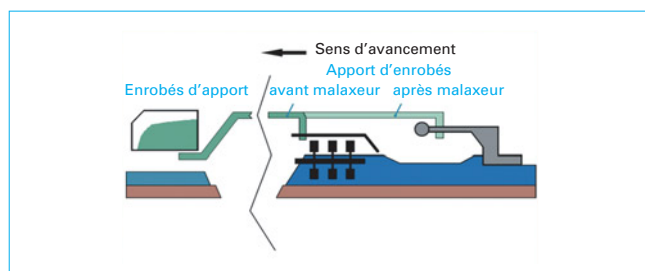


Figure 5 - Principe du thermorecyclage avec apport d'enrobés avant ou après malaxage (crédit USIRF)

■ Les **rendements journaliers** en 4 m de large varient de 6 000 à 8 000 m² pour une profondeur de 3 à 4 cm. Ils descendent à 3 000-5 000 m² pour 7 cm, le maximum admissible.

2.1.3.2 Études préalables

Comme pour toute étude de recyclage en place, la première étape est la reconnaissance préalable du site, qui comprend :

- l'évaluation de l'état structurel de la chaussée ;
- la détermination des causes de désordre(s) sur l'enrobé à recycler ;
- sa composition, son état, son homogénéité.



Figure 6 – Thermorecyclage sur autoroute (crédit Colas)

Si le recyclage est jugé techniquement faisable (voir § 2.1.3.4), l'étude déterminera :

- la profondeur de retraitement ;
- le type et le dosage des correcteurs et ajouts ;
- le type et le dosage du liant d'apport ;

sur la base des mêmes essais de laboratoire que pour l'enrobé neuf « équivalent ».

Le principe est que le mélange thermorecyclé doit avoir des performances au moins équivalentes à celles d'un enrobé neuf destiné au même usage.

L'expérience a montré que :

- lorsque la pénétrabilité du vieux bitume est inférieure à 10 dmm à 25 °C, le matériau ne doit pas être recyclé (on est dans le cas d'une couche de surface, sous trafic lourd) ;
- lorsque la pénétrabilité est supérieure à 30, on peut ajouter un bitume de classe inférieure ;
- entre 10 et 30, l'apport d'un produit régénérant est à prévoir.

2.1.3.3 Avantages et inconvénients

■ Avantages

Comme tous les recyclages en place, le thermorecyclage offre la possibilité de ne traiter qu'une voie (figure 6). Il permet de conserver le niveau fini existant, d'où économie des travaux de raccordement, de réhaussement des glissières, et conservation du tirant d'air sous les passages supérieurs.

Il conduit normalement à une amélioration des profils longitudinaux et transversaux. Il peut aboutir à une amélioration de la macrotexture superficielle et de l'adhérence.

En règle générale, le thermorecyclage produit un enrobé dont les caractéristiques mécaniques sont équivalentes à celles d'un enrobé neuf.

Il peut, de plus, éliminer une interface défectueuse.

■ Problèmes et inconvénients

Les ateliers de thermorecyclage sont très encombrants. Selon la profondeur visée, trois, voire quatre, préchauffeuses sont nécessaires. La longueur de l'atelier peut alors atteindre 150 m.

Si l'enrobé à recycler est humide, il peut y avoir d'importants nuages de vapeur mettant en jeu la sécurité des intervenants et, surtout, des usagers.

L'épaisseur recyclable est au maximum de 7 cm. Des thermorecyclages jusqu'à 9 cm ont été réalisés, mais on a constaté qu'il devenait alors très difficile d'atteindre 80 °C à cette profondeur et que cela conduisait à surchauffer la surface au-delà de 250 °C (on rappelle que le bitume est un mauvais conducteur de la chaleur), d'où dégradation, voire inflammation, du bitume superficiel. D'ailleurs, même pour une épaisseur inférieure à 7 cm, on constate systématiquement une légère perte de masse du bitume *in situ* (0,2 à 0,4 %).

Le procédé est très sensible aux conditions météorologiques (vent en particulier) et à l'humidité de l'enrobé en place (zones poreuses, points bas du profil en long, etc.). Le rendement peut en être très affecté.

Les machines fonctionnent avec un malaxeur « à fond ouvert », ce qui crée un peu de ségrégation et d'hétérogénéité. Par ailleurs, les systèmes de dosage de l'additif (fibres, polyéthylène, etc.) sont moins précis que ceux des centrales fixes.

Enfin, les zones de démarrage nécessitent une grande attention.

2.1.3.4 Domaines et limites d'emploi

En raison de l'encombrement de l'atelier, le **thermorecyclage s'emploie essentiellement sur grands itinéraires à bonnes caractéristiques géométriques** : autoroute, voies express, etc., ce qui correspond surtout à des trafics élevés.

Le thermorecyclage convient particulièrement lorsqu'il s'agit de traiter une seule voie (la voie lente généralement). Il peut également fournir une solution adéquate à des cas de décollement de la couche de roulement.

Il n'y a pas *a priori* de limitation supérieure du trafic. Le thermorecyclage peut également être appliqué sur piste aéronautique.

À l'inverse, le thermorecyclage ne convient pas en zone urbaine, du fait de la taille de l'atelier, de la présence d'obstacles dans les chaussées, et aussi de la présence de citernes de gaz sur les machines.

En pratique, le procédé n'est envisageable que pour des chantiers de taille suffisante (au moins 20 000 m²). Le thermorecyclage ne peut convenir que sur chaussée ne présentant pas de défaut de structure. Il apporte un complément de durée de vie à la (ou aux) couche(s) supérieure(s), soit dans l'attente d'un rechargement à plus longue échéance, soit en étant directement surmonté d'une nouvelle couche de roulement (BBM ou BBTM par exemple).

En raison de la dispersion plus importante dans la composition du mélange thermorecyclé, sa durée de vie prévisible est toutefois inférieure à celle de la solution enlèvement par fraisage + remplacement par enrobé neuf sur la même épaisseur.

D'une manière générale, les techniques de thermorecyclage se sont vues sévèrement concurrencées et, dans beaucoup d'endroits, remplacées par la solution fraisage à froid et remplacement par un enrobé neuf, solution apportant toutes garanties et d'un coût très proche.



a



b

Figure 7 – Photo et schéma d'un train de recyclage à chaud (crédit Fayat)

2.1.4 Train de recyclage à chaud

Un autre procédé de recyclage en place à chaud existe, qui est basé sur l'intervention d'une machine spéciale, dont le cœur n'est autre qu'un tambour-sécheur-enrobeur (TSE) à équicourant. L'atelier (figure 7) comprend, dans l'ordre d'avancement :

- une (ou deux) fraiseuses ;
- un dispositif de collecte ;
- transfert et enfournement des fraisats ;
- le « TSE sur roues » lui-même ;
- un releveur de cordon ;
- puis l'ensemble finisseur + compacteurs.

Plusieurs systèmes d'asservissement et de dosage assurent la régularité du mélange final. La machine comporte également une rampe intégrée pour le répandage de la couche d'accrochage sur la surface fraisée, juste devant le cordon d'enrobé recyclé. La précision des dosages est proche de celle obtenue dans un poste continu TSE classique.

En raison de l'encombrement et de la sophistication de ce matériel, le domaine d'emploi est surtout le recyclage sur réseau primaire (autoroutes, voies express, routes principales).

2.2 Recyclage en place à froid d'enrobés

Le recyclage en place à froid d'enrobés peut être considéré comme un cas particulier de retraitement en place de chaussée, où on ne traite que du noir. Les matériaux obtenus sont, à plusieurs égards, analogues à ceux produits par recyclage à froid en centrale.

Afin d'éviter des répétitions fastidieuses, la présentation qui suit renverra largement au § 1.4 de l'article [C 5 620] pour ce qui concerne les matériaux, et aux § 3.2 et § 3.3 pour les matériels et ateliers de retraitement.

Le recyclage en place à froid d'enrobés fait majoritairement appel à l'émulsion de bitume, les premiers chantiers remontant aux années 1970 aux États-Unis et 1980 en France. La mousse de

bitume a commencé à être utilisée vers la fin des années 1990 dans divers pays dont la France. Elle a maintenant pris une place, certes minoritaire, mais non négligeable.

2.2.1 Faisabilité

La première démarche consiste évidemment à s'assurer de l'existence et de l'homogénéité d'une couche d'enrobés pouvant donner lieu à recyclage *in situ*. Trois conditions sont nécessaires :

- épaisseur minimale de 5 cm ;
- existence de tronçons homogènes assez longs ;
- absence d'obstacles dans la couche (regards, bouches à clés, etc.).

Cela implique la collecte de tous les renseignements disponibles et une reconnaissance précise du site, complétée si nécessaire par sondages.

L'état de l'enrobé en place et sa recyclabilité seront ensuite évalués au cours de l'étude de formulation.

2.2.2 Études de formulation. Consistance et méthodologie

Avec l'émulsion, le déroulement de l'étude est tout à fait analogue à celui d'un recyclage à froid en centrale (voir le diagramme de la figure 12 § 1.4.3 du recyclage en centrale [C 5 620]).

■ Avec la **mousse de bitume**, la démarche intellectuelle est la même, mais les paramètres de caractérisation de la mousse sont bien spécifiques (taux d'expansion et temps de demi-vie). Tous les commentaires faits § 1.4.3 de l'article [C 5 620] sont valables pour le recyclage en place à l'émulsion.

Les particularités de la mousse de bitume sont décrites plus loin, § 3.3 et 3.5. Peu de résultats validés sont disponibles à ce jour concernant les enrobés recyclés à la mousse de bitume. Les études les plus abouties viennent de l'Afrique du Sud et de l'Allemagne.

■ Pour le **recyclage en place à l'émulsion**, les résultats de laboratoire sont voisins de ceux obtenus avec recyclage en centrale, l'écart éventuel se produisant sur le terrain, suite à une dispersion



Figure 8 – Recyclage en place à l'émulsion d'enrobés (crédit Eurovia)

un peu plus importante des dosages en place. Le guide technique CFTR [2] a établi une classification des retraitements en place (voir § 3.2), dans laquelle les recyclages d'enrobés à l'émulsion correspondent à la classe III. Selon ce guide, les objectifs à atteindre en classe III sont :

- abaissement de la température de ramollissement Bille-Anneau (liant après retraitement/liant des recyclats) : 5 à 15 °C ;
- essai Duriez : pourcentage de vides ≤ 14 % ;
- résistance en compression après 14 jours à 18 °C, $R_c \geq 5$ MPa ;
- rapport immersion-compression $r/R \geq 0,7$;
- essai PCG (presse à cisaillement giratoire) : pourcentage de vides ≤ 25 % à 100 girations.

On voit que ces chiffres sont en totale cohérence avec ceux présentés en § 1.4.3.

2.2.3 Mise en œuvre

Les machines spécifiques utilisées pour le recyclage d'enrobés en place à froid sont les mêmes que celles qui opèrent pour les retraitements de chaussée. Les ateliers correspondants sont décrits § 3.2 et § 3.3. On notera simplement que, comme le recyclage d'enrobés doit fournir un mélange final du niveau d'un enrobé neuf, on demande que les systèmes de dosage et de malaxage permettent de garantir la qualité et l'homogénéité du mélange recyclé. Par ailleurs, la taille des machines est à adapter à l'importance du chantier et, en particulier, à l'épaisseur à recycler (figure 8).

Le recyclage en place à froid d'enrobés s'effectue sur une épaisseur (compactée) de 5 à 12 cm. Le taux de recyclage est souvent de 100 %, parfois un peu moindre si l'on ajoute un correcteur granulométrique, lequel est répandu à l'avance sur la surface à malaxer.

2.2.4 Performances. Domaines d'emploi

Les suivis sur le long terme montrent un comportement tout à fait favorable.

Les suivis (peu nombreux) mettent en évidence des teneurs en vides relativement élevées, l'absence de fluage, des modules de rigidité (à 15 °C) entre 3 000 et 4 500 MPa à moyen terme (3-4 ans).

Le recyclage en place à l'émulsion est une solution intéressante pour effacer des défauts comme le plumage par vieillissement du liant, l'orniérage léger ou moyen, le début de faïençage par vieillissement, le collage défectueux de la couche de roulement (il faut alors retraiter au moins 1 cm sous l'interface).

L'épaisseur recyclée peut servir de :

- couchement de roulement jusqu'au trafic T3, éventuellement T2 si le climat et la géométrie sont favorables ;
- couche de liaison jusqu'à T2 ;
- couche de base jusqu'à T1.

Le revêtement peut aller du simple enduit superficiel, jusqu'au béton bitumineux épais.

Les enrobés recyclés à l'émulsion peuvent être livrés au trafic immédiatement. S'ils doivent être revêtus, la pose du revêtement définitif est à différer d'au moins 2 semaines pour favoriser leur mûrissement.

3. Retraitement de chaussée

Par rapport au recyclage en place d'enrobés, le retraitement de chaussée se caractérise par le fait qu'il concerne une épaisseur telle qu'une partie au moins des matériaux retraités ne contient pas de bitume.

Schématiquement, l'opération consiste à fragmenter le revêtement (mince) existant et tout ou partie de la couche de base sous-jacente, et à malaxer l'ensemble avec un (ou deux) liant(s) d'apport. Si l'épaisseur d'enrobé est supérieure à 5 cm, il peut être intéressant de l'enlever par fraisage et de ne retraiter que la partie « blanche ». L'enrobé fraisé pourra être recyclé par ailleurs.

Tous les retraitements de chaussée font appel à des techniques à froid, permettant de travailler des matériaux humides.

Quel que soit le type de retraitement choisi, la pose ultérieure d'un revêtement est obligatoire.

3.1 Études préalables. Faisabilité. Choix d'une technique

3.1.1 Possibilité d'application du procédé

Un retraitement en place est envisageable si les conditions suivantes sont remplies :

- épaisseur de noir limitée (voir précédemment) ;
- les matériaux, une fois décohesionnés, seront compactables :
 - **Granulométrie.** Cela implique de produire des matériaux 0/D dont la granulométrie permet le serrage. Ce résultat peut être obtenu directement par fraisage de tout-venant alluvionnaire grave non traitée (GNT ou GRH), éventuellement grave ou sable traité à faible cohésion. Une granulométrie finale 0/D convenable peut aussi être obtenue par ajout d'un correcteur granulaire, par exemple, apport d'un sable ou d'une grave 0/D dans un matériau à granulométrie trop creuse. Toutefois, la proportion de correcteur ne peut guère excéder 20 à 25 % pour des raisons économiques. La correction granulométrique peut s'appliquer à des tout-venant mal gradués, voire à certains macadams (20/50 par exemple),

- **Dimension maximale des éléments.** En raison des risques de ségrégation, la dimension maximale des éléments ne doit pas dépasser 60 mm,
- Il est clair que **nombre de matériaux constitutifs des chaussées les plus anciennes sont totalement impropres à un retraitement** : les pavés, les hérissons (eh oui, il y en a encore !), la plupart des macadams (40/70, par exemple les tout-venant trop grossiers) ;
- il n’y a **pas trop d’obstacles dans la chaussée** (regards, bouches à clé). Le retraitement de la chaussée est impossible sur certaines voies urbaines ;
- **présence d’une fondation saine.** Il serait, à l’évidence, irrationnel de venir traiter la partie supérieure d’une chaussée en laissant subsister des couches inférieures de mauvaise qualité. De plus, le compactage de la couche retraitée n’est possible que sur un support assez ferme ;
- **matériaux en place suffisamment homogènes.** Un retraitement n’est envisageable que si les matériaux ne varient pas trop, tant dans le profil en long, que dans les profils en travers.

Le **drainage** peut avoir une grande influence sur la tenue de la chaussée. L’établissement d’un drainage efficace, voire sa simple remise en état, sont parfois suffisants pour assainir les sous-couches.

3.1.2 Études préalables

Tout projet de retraitement de chaussée doit d’abord établir sa faisabilité. La figure 9 résume le cheminement d’une étude préalable, qui doit établir la possibilité de retraiter ou non, définir l’épaisseur récupérable et la technique de retraitement adaptée aux objectifs. Vient ensuite l’étude de formulation correspondant à la technique choisie. Des exemples en sont illustrés plus loin.

3.1.2.1 Reconnaissance de la chaussée

Un point est fondamental quel que soit le type de retraitement : la reconnaissance préalable de la chaussée, qui doit être complète et détaillée.

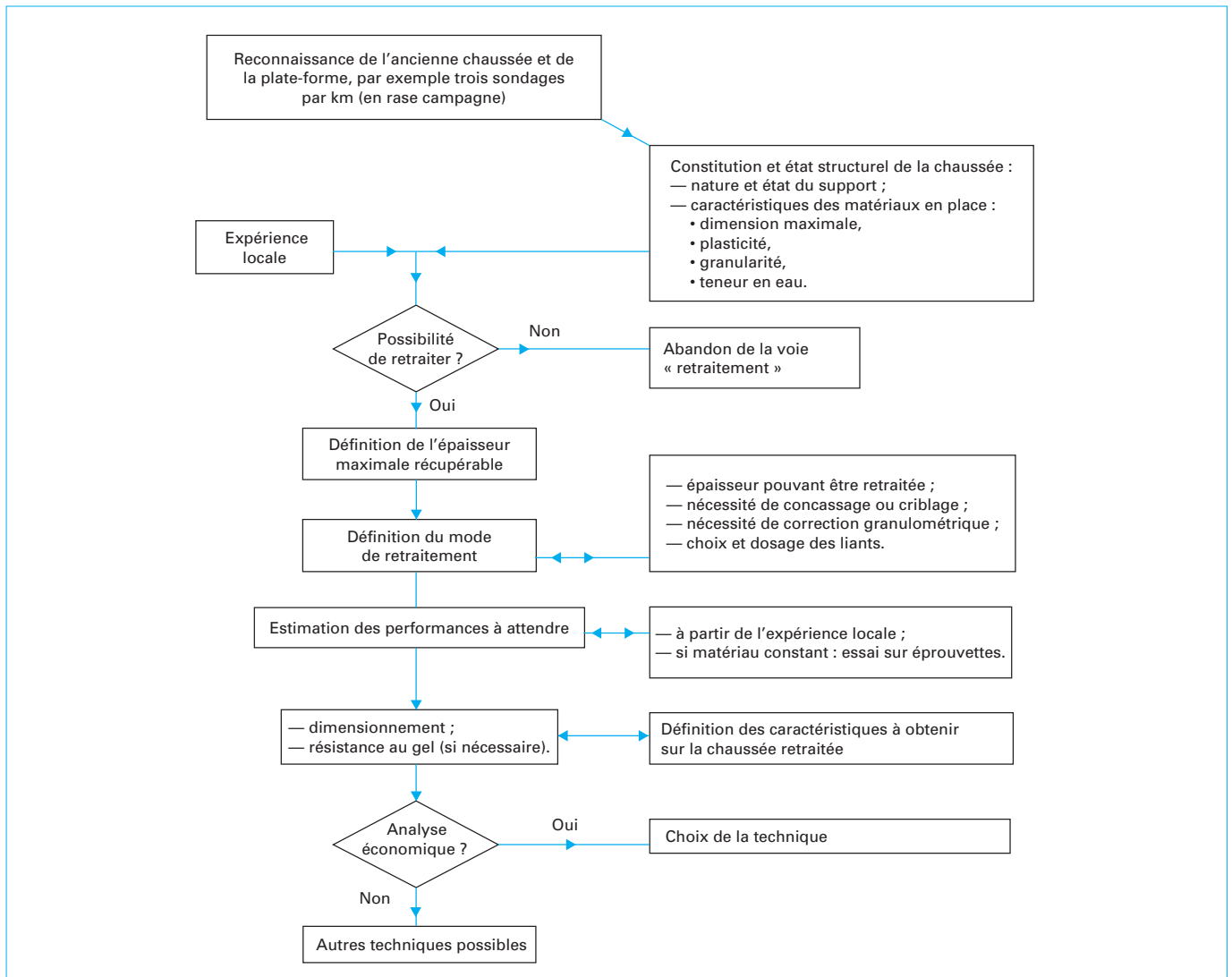


Figure 9 – Diagramme des études préalables au retraitement de chaussée

Tableau 1 – Classification des retraitements selon le CFTR

Nature du retraitement	Retraitement à l'émulsion de bitume			Retraitement avec un liant hydraulique	Retraitement avec un liant composé
Caractéristiques	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Objectif	Renforcement structurel	Réhabilitation des couches de surface		Renforcement structurel	Renforcement structurel ou correction d'un défaut des couches de surface
Principe	Amélioration des caractéristiques mécaniques et géométriques de la chaussée avec plus ou moins d'ancienne assise et éventuellement régénération du bitume dans la classe II		Recyclage de la couverture bitumineuse avec régénération du bitume	Création d'une nouvelle assise ou d'une nouvelle couche de surface (classe V) : – avec ou sans matériau d'apport ; – avec ou sans enlèvement des couches de surface	
Matériaux de l'ancienne chaussée à traiter	3 à 4 cm de couverture bitumineuse + assise non traitée ou traitée aux liants hydrauliques	4 à 8 cm de couverture bitumineuse + assise non traitée ou traitée aux liants hydrauliques	Uniquement des matériaux bitumineux en intégrant l'interface	Tout ou partie de la couverture bitumineuse. Tout ou partie des assises. Éventuellement partie du support	Tout ou partie de la couverture bitumineuse et tout ou partie des assises
Liant	Émulsion de bitume	Émulsion de bitume pur ou régénérant	Émulsion de bitume régénérant	Ciment ou liant hydraulique routier	Mélange ciment ou liant hydraulique routier + émulsion de bitume
Teneur habituelle en liant d'ajout	3 à 5 % de bitume résiduel	1 à 3 % de bitume résiduel	Jusqu'à 2 % de bitume résiduel	3 à 6 % de liant hydraulique	3 à 7 % de liant composé
Épaisseur de la couche traitée	10 à 15 cm	5 à 12 cm	5 à 12 cm	20 à 30 cm	10 à 30 cm

Les chaussées dont le retraitement est envisagé sont souvent assez anciennes et hétérogènes. Il faut donc, si possible, en retrouver l'historique et, de toute façon, effectuer un nombre de sondages suffisant pour :

- connaître avec précision la constitution et l'épaisseur des différentes couches ;
- obtenir une quantité suffisante d'échantillons représentatifs.

Pour l'implantation des sondages, on se méfiera tout particulièrement des cas :

- d'anciennes chaussées débombées, où le profil en travers des couches est très variable ;
- des élargissements, souvent réalisés avec des matériaux différents de ceux de l'ancien corps de chaussée.

Si nécessaire, la zone à traiter sera découpée en tronçons homogènes.

3.1.2.2 Caractérisation des matériaux en place

Pour chaque sondage, on détermine au minimum :

- sur la partie noire :
 - granulométrie après fractionnement,
 - granulométrie après extraction du liant,
 - teneur en liant,
 - pénétrabilité et TBA du liant ;
- sur la partie blanche :
 - granulométrie,
 - équivalent de sable ES,
 - argilosité (valeur au bleu VB, éventuellement limites d'Atterberg).

On peut ainsi calculer, pour le mélange, la granulométrie, la teneur en fines, et leur activité, la teneur en liant, et la demande en correcteur granulométrique.

La teneur et l'argilosité éventuelle des fines sont, comme on le verra plus loin, des paramètres importants pour le choix du type de retraitement.

3.1.3 Classification des retraitements

Dans le guide technique « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées » de juillet 2003 [2], le Comité français pour les techniques routières (CFTR) distingue 5 classes de retraitement, selon l'objectif, les épaisseurs et le type de liant (tableau 1).

La classe III n'est autre que le recyclage en place à froid des enrobés (présenté § 2.2). La mousse de bitume ne figure pas dans ce guide. Le document mériterait d'être actualisé, en y ajoutant la mousse de bitume et les retraitements mixtes (hydraulique plus bitumineux).

3.2 Matériels de retraitement

Les matériels spécifiques de retraitement sont variés ; la composition des ateliers dont ils font partie sur chantier l'est aussi.

3.2.1 Fonctions des ateliers de retraitement

Schématiquement, un atelier de retraitement remplit les fonctions suivantes.

Fonction enlèvement de matériau

Il s'agit soit d'enlever l'enrobé de surface, qui sera recyclé sur le chantier par ailleurs, soit de ménager l'espace nécessaire pour mettre un correcteur granulométrique sans rehausser le niveau final. Cela est effectué le plus souvent avec une fraiseuse (figure 10), exceptionnellement à la niveleuse sur le réseau secondaire.

Fonction apport de correcteur granulométrique

Le correcteur est généralement étalé à la niveleuse, devant la machine de retraitement, qui va malaxer l'ensemble.

Fonctions fragmentation de la chaussée et malaxage

Avec la majorité des ateliers, c'est la machine de retraitement qui remplit ces deux fonctions. La plupart de ces machines comportent un rotor muni de pics et une chambre de malaxage (figure 11). L'eau de mouillage et, s'il y a lieu, le liant d'apport liquide (émulsion ou mousse de bitume) sont dosés sous asservissements, injectés et malaxés dans cette chambre. Certaines machines de haut de gamme possèdent deux rotors : le premier fraise, le second (contrarotatif) malaxe.

Certains matériels disposent d'une grille d'écrépage permettant d'éliminer les éléments trop gros.

Pour les retraitements au liant hydraulique, la méthode courante consiste à épandre le liant au dosage voulu sur la chaussée à retraiter, devant la machine. Des ateliers « sophistiqués » comprennent un engin qui met le liant hydraulique en suspension dans l'eau, ce qui permet de l'injecter et de le doser dans la chambre de malaxage.

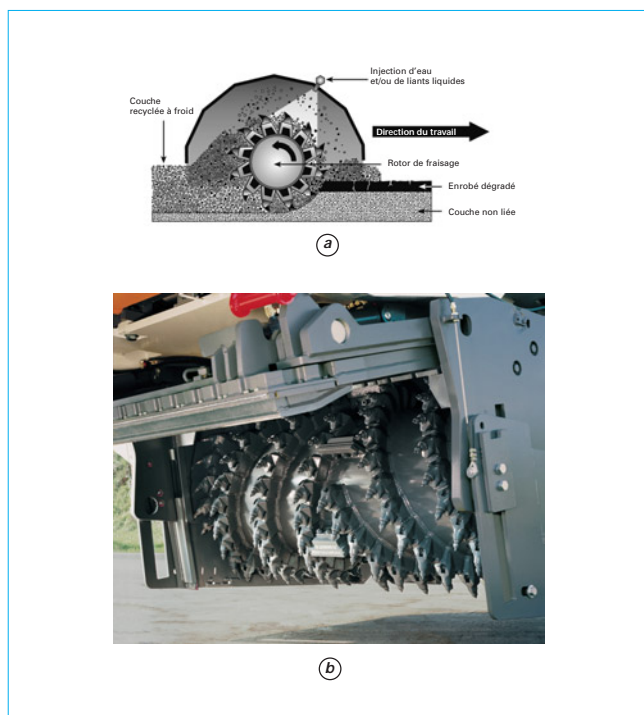


Figure 10 – Schéma et vue d'un rotor de fraisage/malaxage équipé de pics (crédit Wirtgen)

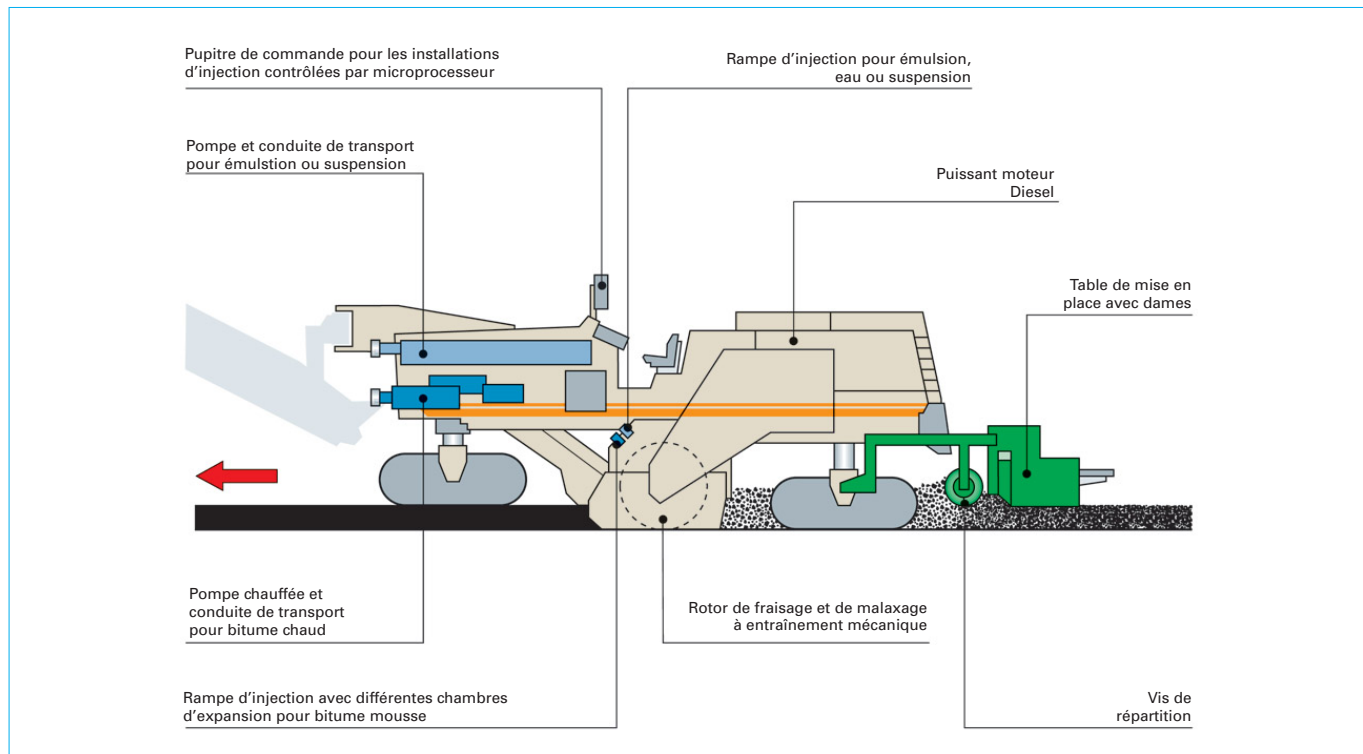


Figure 11 – Schéma de principe d'une machine fraiseuse/malaxeuse (crédit Wirtgen)

Tableau 2 – Critères de qualification des matériels de retraitement (d'après le CFTR)

Critères		Note		
		3	2	1
H	Homogénéisation du matériau avec le ou les liants	Homogénéisation verticale et transversale (malaxeur associé)	Homogénéisation verticale uniquement	Homogénéisation limitée
E	Maîtrise de l'épaisseur traitée	Réglage et contrôle de l'épaisseur avec fonction supplémentaire de maintien à la profondeur (1)	Réglage et contrôle de l'épaisseur	Réglage de l'épaisseur
P	Puissance disponible par mètre linéaire de rotor de fraisage	> 70 kW	35 < P ≤ 70 kW	≤ 35 kW
I	Possibilité d'injecter l'eau dans la chambre de malaxage ou de fragmentation	Pompe à débit variable asservi à la translation et rampe de largeur variable	Pompe à débit variable asservi à la translation	Pas d'asservissement
L	Dosage du liant sous forme de liquide	Pompe à débit variable asservi à la vitesse de translation ou au poids de matériau retraité + débitmètre (eau) et pesée (ciment)	Pompe à débit variable asservi à la vitesse de translation ou au poids de matériau à retraiter + compteur volumétrique	Pompe à débit variable non asservi

(1) La fonction de maintien à la profondeur du rotor de fraisage empêche la remontée de celui-ci en cas d'augmentation trop importante du couple de fraisage. La remontée du rotor ne peut se faire que manuellement par le conducteur.

Tableau 3 – Critères de qualification des épandeurs (d'après le CFTR)

	Critères	Note		
		3	2	1
L	Homogénéité longitudinale d'épandage du liant (en %)	$C_{VL} \leq 5$	$5 < C_{VL} \leq 10$	$C_{VL} > 10$
T	Homogénéité transversale d'épandage du liant (en %)	$C_{VT} \leq 10$	$10 < C_{VT} \leq 20$	$C_{VT} > 20$
V	Possibilité de faire varier la largeur d'épandage	Oui	Non	Non

On note aussi l'existence de machines de type malaxeur-fini-seur, équipées de réservoirs d'eau et d'émulsion, d'un malaxeur à arbres à palettes, et d'une table de finisseur. Une ou deux fraiseuses fragmentent la chaussée devant le malaxeur-fini-seur.

■ Fonction dosage du liant

Avec un liant liquide (émulsion, mousse, suspension), c'est la machine de retraitement qui l'assure.

Avec un liant hydraulique pulvérulent, c'est un épandeur dédié qui le dépose sur la section à traiter, à un dosage surfacique pré-calculé.

■ Fonction réglage et précompactage du matériau retraité

Sur les chantiers « rustiques » (routes secondaires), le réglage peut être effectué à la niveleuse. Avec cet engin, l'uni final peut être médiocre.

Plus généralement, deux configurations d'atelier existent pour ces fonctions :

- **Machine de retraitement déposant le matériau retraité en cordon** : un finisseur précédé d'un releveur de cordon remplit ces fonctions.

• Machine équipée d'une table de finisseur.

On trouve des machines multifonctions de grande taille qui comportent tous les éléments nécessaires à toutes les fonctions précédentes.

Un atelier de compactage classique termine le défilé.

3.2.2 Classification des matériels de retraitement

Le guide CFTR (§ 3.1.3) définit une classification des matériels de fragmentation et de malaxage selon cinq critères :

- H : qualité d'Homogénéisation avec le ou les liant(s) ;
- E : maîtrise de l'Épaisseur de retraitement ;
- P : Puissance disponible ;
- I : dispositif d'Injection d'eau ;
- L : dosage du Liant liquide.

Le tableau 2 indique les critères de notation.

Les épandeurs de liant pulvérulent font également l'objet d'une classification (tableau 3).

3.3 Retraitement à l'émulsion

3.3.1 Particularités

Pour éliminer le risque de ségrégation, les matériaux fragmentés doivent avoir une dimension maximale limitée :

- classe I : 30 mm (avec tolérance de 1 % dépassant 50 mm) ;
- classe II : 25 mm (avec tolérance de 1 % dépassant 40 mm) ;
- classe III : selon l'usage prévu pour l'enrobé recyclé.

Par ailleurs, la présence d'éléments argileux rend difficile l'enrobage à l'émulsion. Le problème peut parfois être résolu par retraitement mixte : chaux, puis émulsion (évidemment, le coût s'en ressent). Sinon, on aura recours à un retraitement au liant hydraulique.

3.3.2 Études et formulation

Le déroulement d'une étude de retraitement de chaussée à l'émulsion est schématisé par la figure 12 [3].

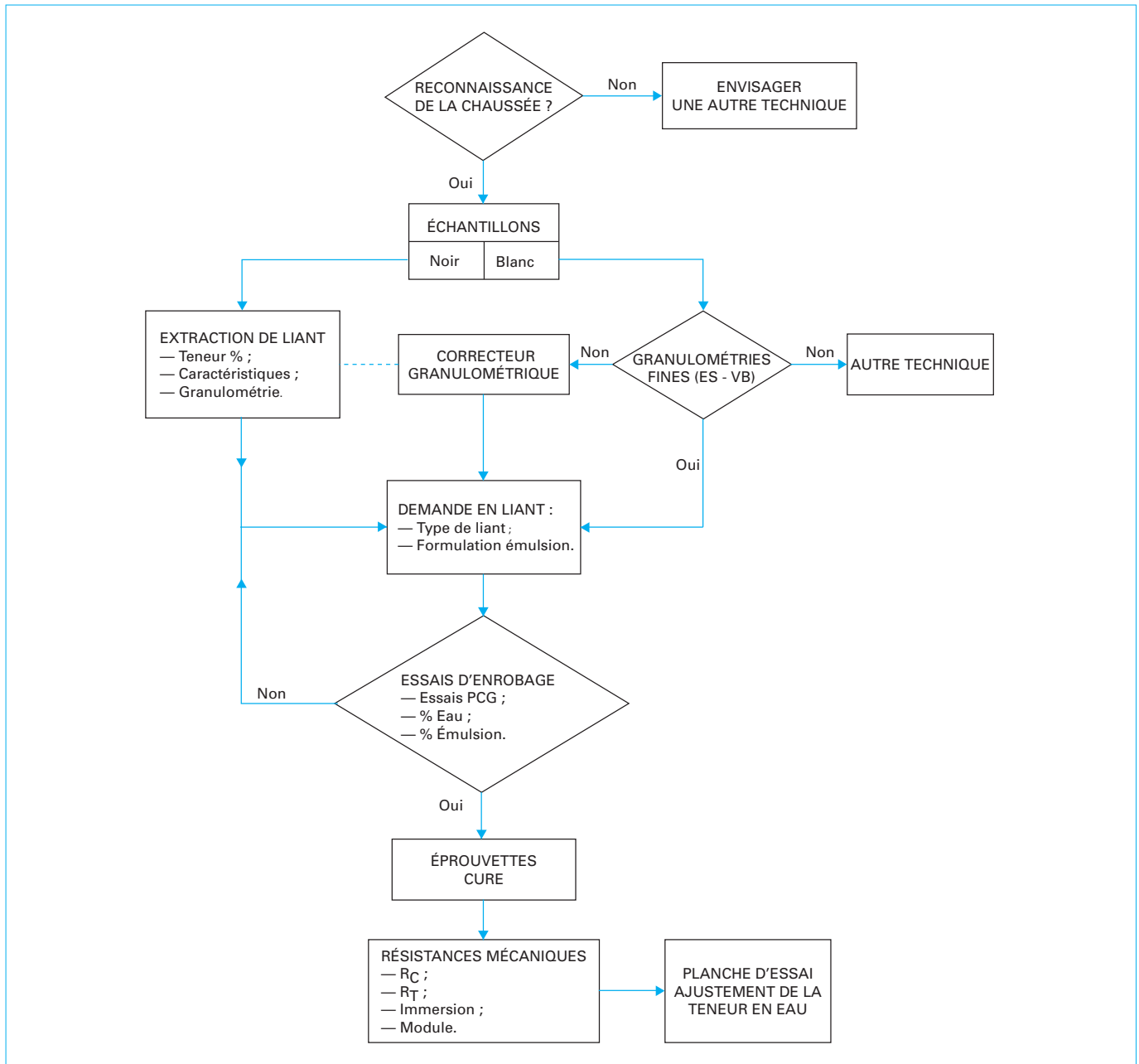


Figure 12 – Diagramme d'une étude de retraitement de chaussée à l'émulsion

Le correcteur granulométrique éventuel, provenant d'une source aussi économique que possible, doit conférer au mélange une courbe bien graduée.

Si la partie noire est majoritaire, on peut être amené à choisir une émulsion régénérante. Si la partie blanche est majoritaire, on retient une émulsion d'enrobage spécifique.

Dans tous les cas, le type de liant et la formulation de l'émulsion sont adaptés au cas particulier (trafic, climat, matériaux), de manière à satisfaire aux critères d'enrobage, de vitesse de rupture, et de caractéristiques mécaniques.

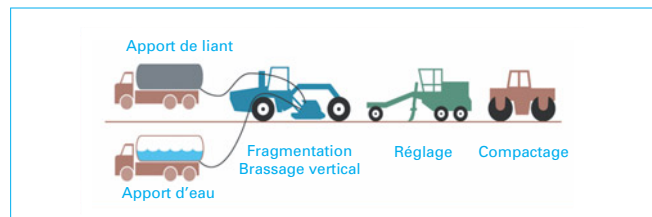


Figure 13 – Exemple d'atelier de retraitement de classe I (crédit USIRF)

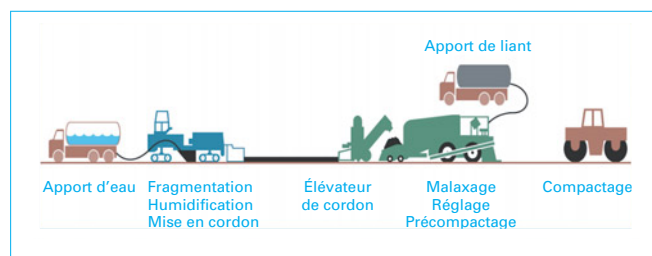


Figure 14 – Exemple d'atelier de retraitement (classe II) ou de recyclage d'enrobés (classe III) avec fraiseuse et malaxeur/finisseur (crédit USIRF)

Pour ces dernières, le guide CFTR indique comme objectifs :

- classe I : – essai Duriez : – résistance à la compression après 14 jours à 18 °C $\geq 1,5$ MPa ;
- rapport immersion/compression $r/R \geq 0$;
- classe II : – essai Duriez : pourcentage de vides ≤ 15 ;
- $R_c (14j) \geq 3$ MPa à 18 °C, $r/R \geq 0,65$;
- essai PCG : pourcentage de vide : ≤ 25 % à 100 girations ;
- classe III : voir § 2.2.2.

3.3.3 Exécution pratique

3.3.3.1 Exemples d'ateliers de retraitement

Le type d'atelier le plus simple comprend un engin de malaxage de type « traitement de sol » (pulvimixer) et une niveleuse pour le réglage (figure 13).

Ce mode de retraitement, rustique et économique, n'est évidemment applicable qu'à des routes secondaires. À noter qu'il ne comporte pas d'écrêtage des gros éléments.

Une autre configuration d'atelier associe fraiseuse(s), releveur de cordon et malaxeur-finisseur (figure 14). Une autre combine une machine munie d'un rotor fraiseur-malaxeur (figure 15), un releveur de cordon et un finisseur (figure 16). Une variante d'atelier plus compact est basée sur l'utilisation d'une machine assurant fragmentation, dosage, malaxage, et réglage (figure 17).

Diverses machines polyvalentes de ce type sont disponibles chez les principaux fabricants de matériel. D'autres ont été conçues et mises au point par des entreprises routières.

3.3.3.2 Couche d'accrochage

Les retraitements de classe I ne nécessitent pas de couche d'accrochage. En classe II et III, le collage de la couche retraitée sur son support est parfois utile. La décision d'appliquer ou non une couche d'accrochage dépend de plusieurs facteurs, tels la nature du support, l'épaisseur de la couche retraitée, son recouvrement plus ou moins épais, etc.

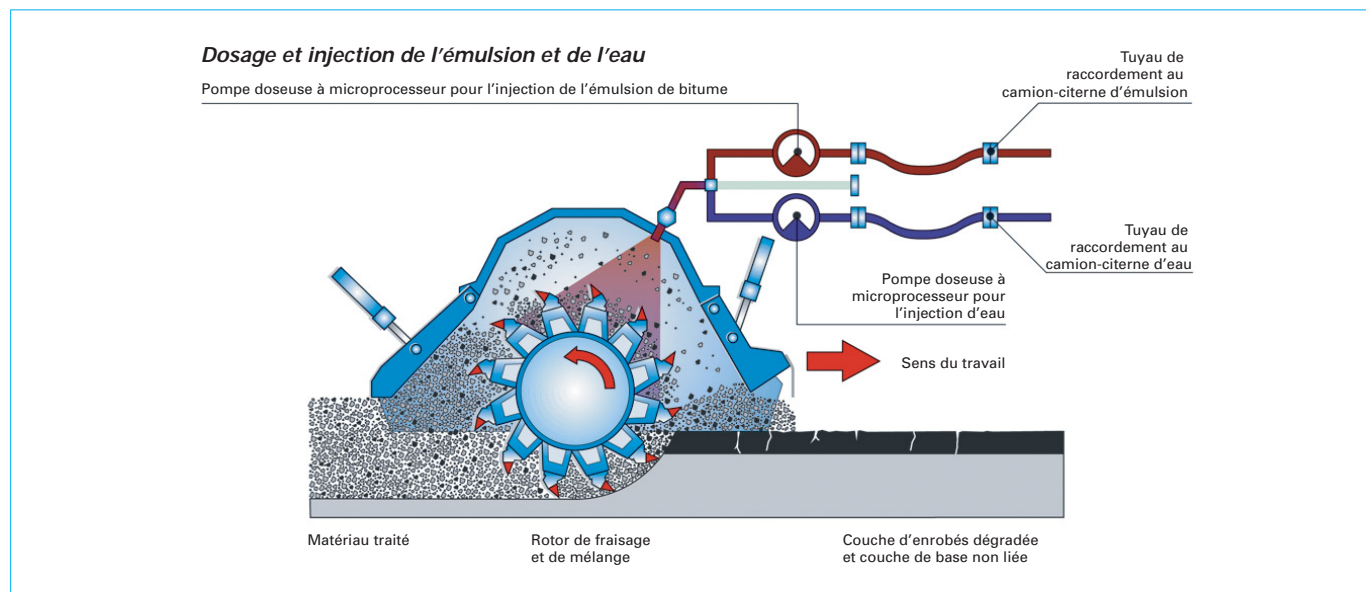


Figure 15 – Fragmentation, dosage et injection d'émulsion et d'eau (crédit Wirtgen)



Figure 16 – Exemple et photos d'atelier de retraitement (classe II) ou de recyclage en place d'enrobés (classe III) avec fraiseuse et malaxeur/finisseur (crédits USIRF et Colas)

Une couche d'accrochage sous un matériau retraité en place ne peut être répandue qu'avec une rampe intégrée montée sur un engin en aval de la fragmentation. Trois solutions existent :

- rampe à l'arrière du releveur de cordon ;
- rampe à l'avant du finisseur ;
- rampe sur machine polyvalente (juste devant la table).

3.3.3.3 Uni

La qualité d'uni dépend beaucoup de la machine qui assure le réglage. Les grosses machines équipées d'une table finisseuse lourde et de dameurs donnent évidemment les meilleurs résultats.

3.3.3.4 Compactage

Compte tenu de la variété des matériaux rencontrés, il est impossible de définir des règles de compactage universelles.

On retiendra néanmoins que l'énergie nécessaire est toujours importante pour les matériaux retraités à froid (figure 18). Les compacités observées se situent dans une large gamme (teneurs en vides de 11 à 19 %).

3.3.3.5 Cure – Scellement – Revêtement

L'ouverture au trafic peut se faire immédiatement. La pose du revêtement définitif doit être différée de 2 semaines au moins, et nettement plus si possible, pour permettre le séchage et le mûrissement. Il convient de ne pas réaliser de retraitement trop tard en saison (le « trop tard » variant selon la région climatique).



Figure 17 – Atelier de retraitement à l'émulsion avec machine multifonctions (crédit Wirtgen)



Figure 18 – Compactage de matériau retraité à l'émulsion (crédit SCREG Sud-Ouest)

On est souvent amené à protéger immédiatement la surface du matériau traité contre l'abrasion et les arrachements par un léger enduit « de scellement ».

Les revêtements définitifs, appliqués après le délai de cure, sont divers (voir § 3.3.4).

3.3.4 Performances. Domaine d'emploi

La technique est pratiquée dans nombre de pays et les réalisations sont très diverses, avec un bilan globalement très positif.

Les points sensibles sont la compacité (nécessité d'un bon support) et l'uni, très dépendant du mode de mise en œuvre.

Dans les conditions françaises définies plus haut, la palette des retraitements à l'émulsion est large. Les quelques résultats disponibles montrent, par exemple, que le module (à 15 °C) va, à moyen terme, de 1 500 MPa à 4 500 MPa environ.

La destination normale d'une couche retraitée à l'émulsion est celle d'une couche de base, utilisable normalement jusqu'à T1. Selon le trafic, la couche de roulement recommandée *a minima* est :

- inférieure à T3 : enduit superficiel ;
- T3 : béton bitumineux très mince (à chaud ou à froid) ;
- T2 : béton bitumineux mince (à chaud ou à froid) ;
- T1 : béton bitumineux épais.

Au-dessus de T1, le retraitement en place est envisageable dans le cadre d'une opération de réhabilitation/renforcement, sous réserve d'une étude spécifique. Il sera recouvert alors d'au moins deux couches d'enrobés.

3.3.5 Dimensionnement

Plusieurs méthodes de dimensionnement sont proposées, en particulier aux États-Unis (AASHTO, Asphalt Institute) et en France (CFTR). Elles restent très empiriques, faute de données permettant la modélisation rationnelle. De plus, la grande variété des matériaux de départ rend difficile la conception d'un modèle universel.

Enfin, les matériaux enrobés à l'émulsion sont des matériaux évolutifs, qui mûrissent et se consolident progressivement *in situ*. Aucune méthode ne sait aujourd'hui rendre compte de cette particularité.

Les méthodes proposées à ce jour doivent donc être utilisées avec précaution, en particulier en vérifiant que leurs hypothèses de base correspondent au cas que l'on veut traiter.

3.4 Retraitement à la mousse de bitume

La mousse de bitume est fabriquée par injection d'une petite quantité d'eau (1,5 à 3 %) dans un bitume très chaud (170-200 °C). Sitôt formée, elle est injectée dans le malaxeur (figure 19).

Bien que ce type de liant soit chaud au moment où il entre en contact avec les granulats et recyclats, les mélanges granulaires à la mousse peuvent être considérés comme des matériaux à froid. En effet, comme les granulats et recyclats sont utilisés humides et à température ambiante, il en va de même du mélange final, qui reste maniable et compactable sans réchauffage.

La mousse de bitume a surtout pour avantage de permettre de fabriquer des matériaux à froid dans les régions dépourvues d'usine d'émulsion (ou à des entreprises n'en disposant pas).

Cette technologie a commencé à se développer vraiment vers le milieu des années 1990 en Australie, puis en Afrique du Sud, puis dans la plupart des pays développés. Elle n'est pas encore codifiée dans nombre de pays, dont la France.

3.4.1 Particularités

La mousse de bitume n'est pas stockable. Elle est fabriquée en ligne juste avant les injecteurs. Les matériels qui mélangent mousse et granulats/recyclats sont donc équipés d'un dispositif (« kit » en français) de production et d'injection de la mousse. **Tout matériel mobile de (re)traitement à la mousse est donc relié à une citerne de bitume chaud qui se déplace devant ou à côté de lui. La présence de bitume très chaud sur le chantier impose des mesures de sécurité très strictes.**

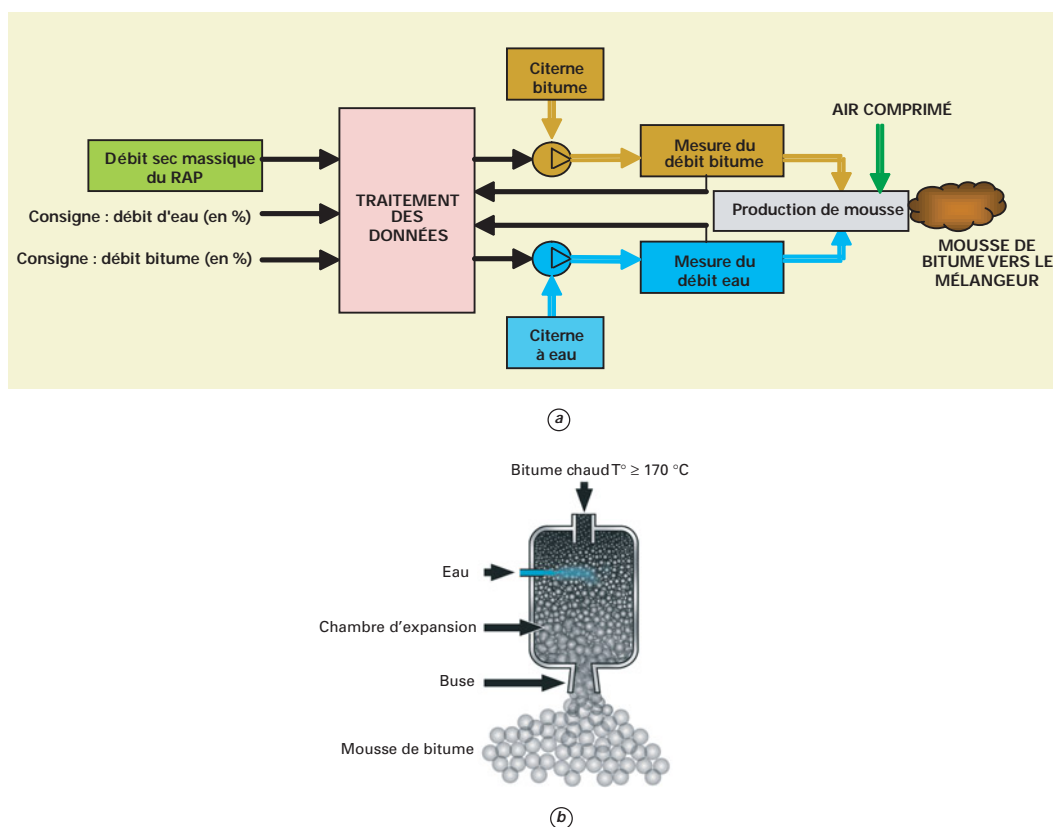


Figure 19 - Schémas de principe de la génération de mousse de bitume (crédits Wirtgen (a) et Fayat (b))

Dans le mélange, la mousse de bitume ne se répartit pas en film continu, à la différence des émulsions. Elle forme une sorte de « mouchetis » de globules de bitume au sein du matériau malaxé.

Comparée aux émulsions de bitume, la mousse est plus facile à mélanger dans les matériaux riches en fines (même légèrement plastiques), car on ne cherche une répartition uniforme et on ne craint pas le phénomène de rupture. Il est même recommandé de traiter des matériaux ayant un minimum de fines (5 % environ).

Comme on le verra plus loin, les résistances mécaniques à sec de mélanges à la mousse sont voisines de celles de mélanges « équivalents » à l'émulsion, après mûrissement. Par contre, conséquence de la répartition très discontinue de bitume, les résistances après immersion sont nettement inférieures. Pour cette raison, le traitement à la mousse est très souvent combiné avec l'adjonction de ciment, chaux, ou liant hydraulique routier (LHR). Cela peut correspondre à deux concepts distincts :

- soit on traite avec un très faible pourcentage de liant hydraulique, simplement pour neutraliser des fines trop limoneuses ou argileuses, et c'est la mousse qui amène les améliorations mécaniques ;
- soit on traite avec un pourcentage de liant hydraulique qui augmente les propriétés mécaniques du mélange (module de rigidité, résistances en compression, traction, etc.). Dans ce cas, qui semble être le plus fréquent, le traitement est à considérer comme un traitement mixte (voir § 3.6).

3.4.2 Études et formulation

Le déroulement d'une étude de retraitement à la mousse est analogue, dans son principe, à celui d'une étude à l'émulsion (cf. figure 12). Le grade de bitume, le(s) additifs, sont choisis en fonction du cas à traiter. Le choix – très fréquent – d'un liant hydraulique ou pouzzolanique est une étape supplémentaire.

À ce jour, l'ensemble de spécifications le plus abouti est celui de l'Asphalt Academy d'Afrique du Sud [4]. Ainsi, ce guide technique définit 4 catégories de matériaux traités à la mousse (tableau 4) :

Tableau 4 – Classification des matériaux traités à la mousse (South African Asphalt Academy)			
Classe de matériau traité		Résistance en traction par fendage à 25 °C (MPa)	
		0,1-0,3	0,3-0,5
Résistance en compression simple à 25 °C (MPa)	0,7-1,4	FB4	FB3
	1,4-2,0	FB2	FB1
Les résistances sont mesurées sur éprouvettes ayant subi une cure de 72 heures à 40 °C.			
Attention : les chiffres correspondent à des matériaux traités et non à des retraitements de chaussée. On pourra néanmoins s'y référer, dans l'attente de spécifications propres au retraitement de chaussée.			

3.4.3 Exécution pratique

Globalement, les dispositions sont analogues à celles des retraitements à l'émulsion. Les machines de retraitement, identiques pour l'essentiel, sont équipées d'un dispositif de génération et d'injection de mousse, branché directement sur la chambre de malaxage. Une citerne de bitume chaud les accompagne (figure 20).

Dans beaucoup de cas, la fragmentation et le malaxage avec la mousse sont précédés de l'épandage d'une petite quantité de ciment, chaux ou LHR (liant hydraulique routier).

3.4 Performances. Domaine d'emploi

Le recul est pour l'instant trop limité pour pouvoir porter un jugement étayé sur le comportement en place et définir le domaine d'emploi (figure 21).

Les remarques faites plus haut sur le dimensionnement des retraitements à l'émulsion s'étendent à la mousse.

3.5 Retraitement au liant hydraulique

3.5.1 Objectifs

Outre tous les objectifs que peut avoir un retraitement (remise au profil, homogénéisation, stabilisation), les retraitements au liant hydraulique ou pouzzolanique sont destinés à rigidifier le corps de chaussée sur une épaisseur importante (20 à 30 cm). Cet apport structurel, ou cette restauration, s'inscrit dans une stratégie de réhabilitation/renforcement.

Le choix de cette technique peut aussi être justifié par le besoin de conférer ou de rendre à la chaussée une bonne tenue aux cycles de gel-dégel.

3.5.2 Particularités

Rappelons que les retraitements au liant hydraulique correspondent à la classe IV du guide CFTR.

3.5.2.1 Matériaux en place

Pour éviter la ségrégation, les gros éléments du matériau en place devront être éliminés par criblage ou concassage. Les cas extrêmes de spécifications pour D_{max} sont :

- 60 mm (avec une tolérance de 1 % supérieur à 80 mm) pour les chaussées à très faible trafic ;
- 20 mm (au sens de la norme NF P 98-116) pour les chaussées à fort trafic.

L'ajout d'un correcteur granulométrique est assez souvent nécessaire pour obtenir une granulométrie O/D continue favorable pour le compactage.

L'argilosité est un critère essentiel pour le choix du liant. La chaux sera retenue pour les matériaux réellement argileux. Le double traitement chaux-ciment se justifie dans quelques rares cas.

Enfin, il convient de vérifier qu'aucune zone à retraiter ne contient de sels solubles ou autres polluants susceptibles de perturber la prise du liant.

3.5.2.2 Intérêt de la préfissuration

Un retraitement au ciment ou LHR peut avantageusement être complété par la préfissuration de la couche traitée, de manière à réduire la nocivité des fissures de retrait et retarder leur remontée.

3.5.2.3 Intérêt des liants hydrauliques routiers

Il existe toute une gamme de LHR qui ont, par rapport au ciment normalisé comme le CPJ, un délai de maniabilité allongé et, généralement, une grande affinité pour les granulats locaux, ainsi qu'un coût inférieur.

3.5.3 Études et formulation

Dans un retraitement au LH, la proportion de noir ne dépasse pas, en pratique, 30 %. En effet, s'il y a davantage d'enrobé dans la structure existante – ce qui est rarissime –, il est avantageux de le recycler à part. Aussi, les études s'inscrivent-elles dans la logique des études de matériaux hydrauliques :

- référence à l'essai Proctor Modifié pour le compactage ;
- résistance en traction, soit directe R_t , soit par fendage (brésilien) R_{tb} ;
- module sécant.

Variante: injection d'eau et de bitume mousse à une dose précise par le 2200 CR

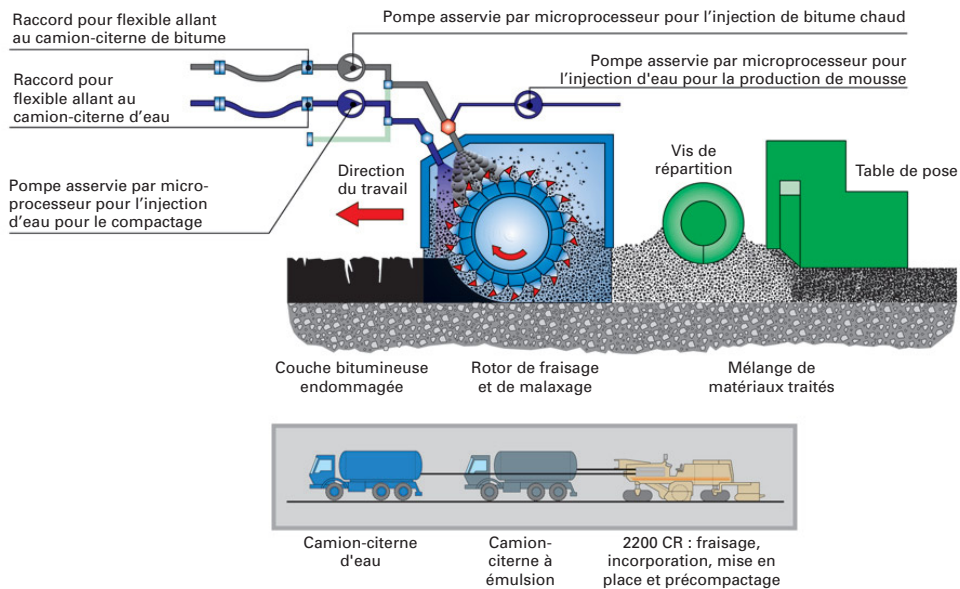


Figure 20 – Principe et machine multifonctions de retraitement à la mousse de bitume (crédit Wirtgen)



Figure 21 – Chaussées secondaires retraitées à la mousse (Norvège)

Les valeurs sont mesurées à 28, 60, ou 90 jours, selon la nature du liant, et extrapolées à 360 jours pour le dimensionnement [6].

L'étude se déroule suivant la même logique qu'une étude de retraitement au liant bitumineux. Les études conduisent à demander un niveau de compacité élevé (un minimum de 98 % du Proctor Modifié est courant).

Le dosage en liant retenu varie fortement selon la nature des matériaux blancs, le pourcentage de noir, la teneur en fines, l'épaisseur et la situation de la couche retraitée dans la nouvelle structure. En pratique, il se situe ainsi :

- chaux : 0,5 à 2 % ;
- ciment ou LHR : 3 à 6 %.

3.5.4 Exécution pratique

Pour le « cœur » d'un retraitement au LH – la fragmentation et le malaxage –, les machines sont fondamentalement les mêmes que pour les autres retraitements. Cependant, la composition de l'atelier a ses spécificités. Ainsi, on n'emploie pas de finisseur.

3.5.4.1 Épandage et dosage du liant (figure 22)

La méthode la plus courante consiste à épandre le liant devant la machine de fragmentation (figure 23). Cette opération est, normalement, effectuée par un épandeur à dosage pondéral asservi à la vitesse d'avancement, matériel qui assure la précision de la quantité de liant au m².

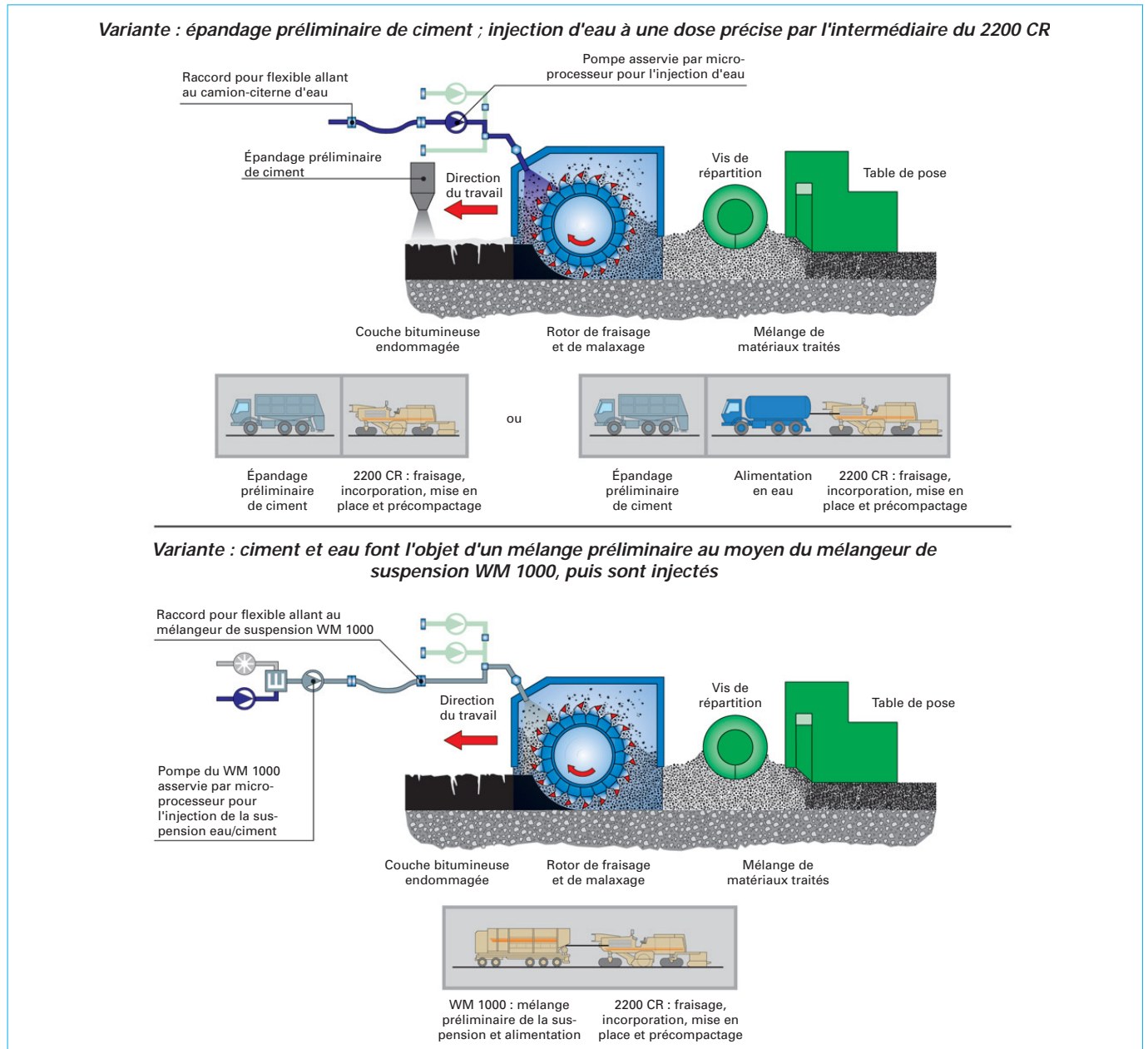


Figure 22 – Les deux méthodes d'incorporation d'un liant hydraulique (crédit Wirtgen)



(a) épandage préalable du ciment



(b) retraitement au ciment d'une route secondaire

Figure 23 – Épandage du liant devant la machine de fragmentation et malaxage en place (crédit Cimbéton)



Figure 24 – Retraitement au ciment avec machine multifonctions (crédit Eiffage TP)

Pour les chantiers les plus économiques (très faible trafic), il arrive que l'on se contente d'un épandage manuel, avec dosage basé sur le nombre de sacs par unité de surface [7].

Des ateliers perfectionnés associent un matériel de préparation d'une suspension ou « coulis » eau-LH, et une machine de fragmentation/malaxage, qui injecte et dose la suspension dans sa chambre de malaxage, tout ceci avec asservissement à la vitesse (figure 24).

3.5.4.2 Réglage

Sur les chantiers les plus simples, le réglage est effectué à la niveleuse. Les points sensibles sont l'uni et le risque de ségrégation.

Pour les routes à fort trafic, on sélectionne une machine polyvalente équipée d'une lame de réglage. En haut de gamme existent des machines pourvues d'une table vibrante lourde.

3.5.4.3 Compactage

Vu l'épaisseur retraitée, une grande énergie de compactage est nécessaire. L'atelier de compactage comprend un ou des vibrant(s) compacteur(s) à pneumatiques lourds. L'optimisation de la teneur en eau est un facteur important. Le compactage doit être mené rapidement.

3.5.4.4 Cure. Scellement. Revêtement

La couche retraitée au LH doit être immédiatement protégée contre la dessiccation et les arrachements sous trafic. Un enduit de cure est donc appliqué au minimum à la fin de chaque journée de travail, plus souvent si les conditions météorologiques sont défavorables (forte chaleur, orages). Le revêtement définitif suit à bref délai.

3.5.5 Performances. Domaine d'emploi

Les réalisations sont très variées, de la petite route départementale au reconditionnement de chaussée d'autoroute. Quelques échecs ont été enregistrés suite à des opérations trop « rustiques », probablement insuffisamment étudiées et contrôlées. Ceci mis à part, le bilan est positif, les objectifs prioritaires de renforcement de la structure et de mise hors gel étant remplis [5].

Les points sensibles sont le respect de l'épaisseur et, pour les chantiers avec niveleuse, l'uni et la ségrégation. Si le liant est épandu sur la surface à traiter, l'émission de poussières peut être très gênante, surtout en zone urbaine. Des liants « sans poussière » sont disponibles, chaux, comme liants hydrauliques routiers.

Les modules mesurés sur échantillons carottés sont eux aussi très variables, variant, d'après la littérature disponible, de 10 000 à 20 000 MPa environ. Normal, vu la diversité des matériaux en place et des liants. Dans les conditions françaises, le retraitement au liant hydraulique est utilisable jusqu'à T1 inclus, avec les revêtements suivants :

- inférieur à T3 : enduit superficiel ou ECF ;
- T3 : béton bitumineux mince ;
- T2 : béton bitumineux épais ;
- T1 : 2 couches de béton bitumineux.

Au-dessus de T1, une étude spécifique est indispensable.

3.5.6 Dimensionnement

Le dimensionnement des retraitements au LH est essentiellement empirique dans la majorité des pays qui y ont recours (expérience locale et/ou assimilation à un matériau neuf connu).

La pratique française comporte deux volets.

■ Pour les faibles trafics, la structure est déterminée par application du manuel de conception des chaussées neuves à faibles trafics (SETRA-LCPC), avec l'adaptation suivante. Pour tenir compte

Tableau 5 – Retraitements mixtes.
Fourchettes de dosages en liant

Matériau à retraiter	Émulsion. Bitume résiduel (%)	Mousse Bitume (%)
90 % blanc + 10 % noir	2,5-4	2,5-4
75 % blanc + 25 % noir	2-3,5	2-3,5
Ciment : dosage compris entre 1 et 2,5 %.		

des incertitudes sur la qualité des matériaux liées à un retraitement en place, on décline (d'une classe) ces matériaux par rapport aux matériaux fabriqués en centrale ayant les mêmes caractéristiques mécaniques (R_t , E_t).

■ **Pour les forts trafics (T2 et T1)**, on applique la méthode ALIZE, conformément aux indications du guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » (SETRA-LCPC), ce qui implique d'avoir mené une étude complète des propriétés du matériau.

Dans les deux cas, il est indispensable de bien connaître les caractéristiques du support (plate-forme et couche sous-jacente) pour pouvoir modéliser l'ensemble avec un minimum de précision.

3.6 Retraitement mixte (hydraulique + bitumineux)

3.6.1 Les deux approches

L'association d'un liant hydraulique et d'un liant bitumineux peut résulter de deux raisonnements différents.

■ Blanc assoupli

Diverses études et expérimentations ont montré que l'incorporation d'une fraction bitumineuse dans un matériau traité au liant hydraulique en fait décroître le module de rigidité sans faire chuter la résistance en traction dans les mêmes proportions. Cela rejoint les constatations présentées (§ 1.6 de [C 5 620]) à propos du traitement de recyclats d'enrobés au liant hydraulique.

Rappelons que cette combinaison (module diminué-résistance en traction conservée) est très intéressante en termes de dimensionnement. De là, l'idée d'améliorer un matériau hydraulique par incorporation de liant bitumineux.

■ Neutralisation de fines nocives

Le traitement de matériaux chargés en fines, surtout si elles sont (légèrement) argileuses avec un liant bitumineux peut s'avérer problématique. Le moyen le plus efficace de surmonter cet obstacle est d'ajouter une petite quantité de liant hydraulique ou pouzzolanique juste avant, ou en même temps que le liant bitumineux. Ce procédé est très souvent employé avec la mousse de bitume, plus rarement avec l'émulsion.

3.6.2 Études et formulation

Si le noir est majoritaire, l'étude de laboratoire est basée sur des essais pour enrobés à froid (PCG, Duriez, module dynamique, etc.).

Si le blanc est prépondérant, l'étude comprend des essais pour matériaux hydrauliques (résistance en traction, module sécant, etc.).

La logique de déroulement des études, préalable et de formulation est la même que précédemment. La question est de savoir où se situe la limite entre les deux approches. On ne peut y répondre

que partiellement ; subsiste donc une zone floue entre les deux. Il apparaît que :

- avec la chaux (0,5 à 2 %), le matériau est de type bitumineux ;
- à partir de 2 % de ciment, la rigidification commence à être nette.

Les dosages retenus dépendent évidemment de la nature des matériaux à retraiter. Le tableau 5 montre quelques chiffres correspondant aux pratiques dans divers pays.

Avec la mousse de bitume, un couple de dosages fréquemment pratiqué est 2 % de ciment – 2 % de mousse.

3.6.3 Exécution pratique

3.6.3.1 Préparation, incorporation, et dosage du liant hydraulique

Trois méthodes sont utilisées.

■ **Liant composé prêt à l'emploi.** Ce type de liant est constitué du mélange, en proportions fixées, d'une émulsion spéciale et d'une suspension de LH. La préparation ne peut être assurée que par une machine dédiée très spécialisée. Aussi, le procédé ne s'est-il que peu développé.

■ **Préparation d'une suspension de LH,** injection et dosage simultanés avec le liant bitumineux (figure 25). Ce procédé a l'avantage de faire appel à des matériels relativement disponibles. Les dosages sont précis.

■ **Épandage préalable du liant hydraulique, sur la surface.** Cette méthode est la plus simple et la plus courante.

3.6.3.2 Ateliers de retraitement

Ils sont, dans l'ensemble, semblables à ceux utilisés pour les retraitements à l'émulsion ou à la mousse, avec, en plus, machine et dispositif pour l'ajout du liant hydraulique (figure 26). L'épaisseur de matériau retraits se situe entre 10 et 30 cm.

3.6.3.3 Compactage

Les règles de compactage diffèrent selon que le matériau est à prépondérance bitumineuse ou hydraulique.

3.6.3.4 Cure. Scellement. Revêtement

Un enduit de cure est à appliquer à bref délai après la fin du compactage. Le délai dans lequel le revêtement définitif doit être posé dépend de divers facteurs : proportion bitumineux/hydraulique, climat, trafic.

3.6.4 Performances. Domaine d'emploi

Les résultats de suivi en place sont peu nombreux. L'éventail des performances *in situ* est très ouvert. La littérature ne fait pas état d'échecs significatifs. On notera toutefois que, dès que le matériau retraits atteint une certaine rigidité liée à la prise du liant hydraulique, des fissures transversales de retrait apparaissent.

La technique est certainement utilisable jusqu'aux trafics de classe T1 inclus. Le type et l'épaisseur de revêtement sont à choisir, selon le cas, comme indiqué § 3.3.4 (émulsion) ou § 3.5.5 (LH).

3.6.5 Dimensionnement

Si le retraitement est à prépondérance bitumineuse, les commentaires faits au § 3.3.5 (émulsion) et § 3.4.4 (mousse) sont valables. Si le prépondérant est hydraulique, on peut se référer au § 3.5.6.

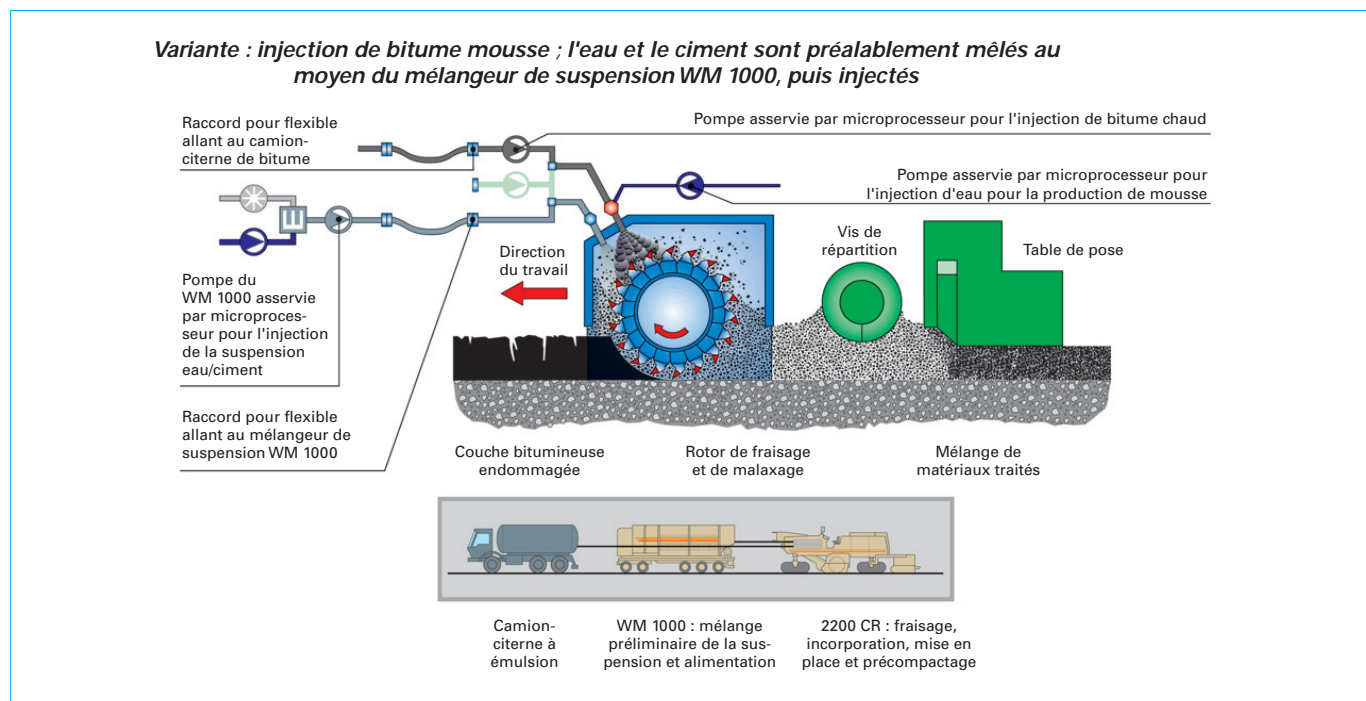


Figure 25 – Schéma d'injection simultanée de liant bitumineux et de suspension de liant hydraulique (crédit Wirtgen)



Figure 26 – Machine à hautes performances destinée au retraitement mixte « ciment + mousse » (crédit Wirtgen)

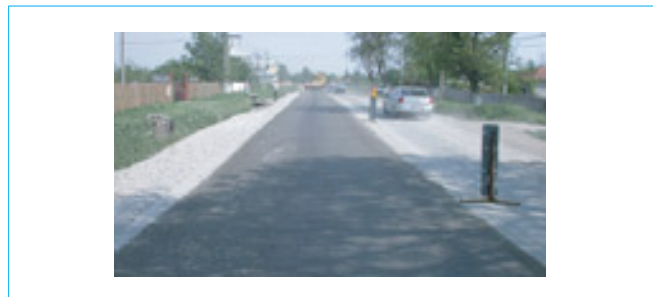


Figure 27 – Chaussée réhabilitée par retraitement en place (crédit Wirtgen)

Toutefois, il faut bien voir que, le recul et les résultats de suivi étant limités, les coefficients d'agressivité du trafic et de calage du matériau ne peuvent pas être connus avec certitude.

4. Conclusion

Le suivi du comportement des nombreuses réalisations en matière de recyclage des matériaux et de retraitement des chaussées fournit un bilan technique tout à fait positif (figure 27). Il confirme que tous les matériaux routiers peuvent être recyclés.

Des techniques très diverses sont disponibles, dont certaines sont largement éprouvées et validées. D'autres, plus innovantes, laissent entrevoir des possibilités supplémentaires.

En matière de matériels, l'inventivité des ingénieurs a été manifeste. Des machines performantes adoptées, puissantes, précises, permettent de livrer des ouvrages de qualité.

Tous les avantages du recyclage sont ainsi accessibles : économie de ressources (matériaux), d'énergie, d'espaces naturels, réduction des émissions etc. Les retraitements en place offrent des économies supplémentaires de transport, des possibilités de limiter l'intervention aux seules voies dégradées.

Les techniques innovantes ont encore besoin d'être suivies et sans doute améliorées.

L'intérêt du recyclage, en termes économiques, mérite d'être analysé de manière approfondie à partir de cas-types. Enfin et surtout, les avantages considérables du recyclage et du retraitement en matière de développement durable restent à chiffrer par analyse du cycle vie.