

Liants hydrauliques routiers

par **Joseph ABDO**

*Docteur ingénieur de l'École des mines de Paris et ingénieur de l'École nationale des ponts et chaussées
Directeur délégué Routes, Cimbéton, Paris*

1. Contexte d'emploi et avantages	C 921 – 2
1.1 Avantages	— 2
1.2 Domaines d'emploi	— 2
1.3 Limites d'utilisation	— 2
1.4 Production française.....	— 2
2. Constituants	— 2
2.1 Constituants principaux	— 2
2.2 Constituants secondaires	— 6
2.3 Sulfate de calcium(Cs)	— 6
2.4 Additifs	— 6
3. Fabrication	— 6
4. Principales caractéristiques	— 6
4.1 Caractéristiques de la poudre	— 6
4.2 Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur mortier normal	— 6
5. Prise et durcissement	— 7
6. Gamme de produits	— 7
6.1 Grandes familles de liants hydrauliques routiers (LHR)	— 7
6.2 Recherche de nouveaux liants	— 7
7. Normalisation	— 7
7.1 Liants	— 7
7.2 Constituants et codification des liants	— 8
7.3 Exigences.....	— 8
7.4 Composition	— 9
7.5 Désignation normalisée	— 9
7.6 Critères de conformité.....	— 9
7.7 Certification	— 9
8. Domaines d'emploi	— 10
8.1 Traitement des sols	— 10
8.2 Traitement des graves.....	— 12
8.3 Retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques routiers	— 14
8.4 Conclusion	— 16
Pour en savoir plus.....	Doc. C 921

En complément des ciments normalisés, se sont développés, à partir des années 1980, des liants dénommés « liants hydrauliques routiers ou LHR », mis au point spécialement pour une utilisation en traitement des sols en place ou en centrale, pour la confection de matériaux d'assises de chaussées et pour le retraitement en place à froid des anciennes chaussées.

Ce sont des liants composites obtenus par mélange et/ou broyage de clinker ou de coproduits de l'industrie (laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, etc.).

Les principes d'action des liants hydrauliques routiers ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportions différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les liants hydrauliques routiers font l'objet de deux normes européennes :

- NF EN 13282-1 « Liants hydrauliques routiers à cinétique rapide – Composition, spécification et critères de conformité » ;
- NF EN 13282-2 « Liants hydrauliques routiers à cinétique normale – Composition, spécification et critères de conformité ».

Ces liants se sont beaucoup développés ces dernières années car ils apportent certains avantages, notamment sur les plans techniques et économiques. Ce que nous allons voir en détail dans ce dossier.

1. Contexte d'emploi et avantages

Un liant hydraulique routier est un produit fini, fabriqué en usine et distribué prêt à l'emploi. Il se présente sous forme d'une poudre minérale qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement, aussi bien à l'air que sous l'eau.

La prise et le durcissement sont dus à la formation de composés hydratés stables, très peu solubles dans l'eau, présentant une forte adhérence entre eux et aux sols ou granulats destinés au traitement, et créant ainsi progressivement une cohésion croissante des pâtes et des mélanges.

Ce qui le différencie d'un ciment est :

- sa teneur en clinker qui est généralement faible ou nulle ;
- sa cinétique de prise et de durcissement qui peut être lente, propriété très recherchée dans les travaux routiers pour des raisons de délai de maniabilité minimal des matériaux.

1.1 Avantages

■ Plan technique

Les liants hydrauliques routiers peuvent être formulés afin de donner les meilleurs résultats pour les opérations de terrassements ou de construction d'assises de chaussées, tant en terme de facilité d'usage (délai de maniabilité en particulier), que de niveau de performances du mélange final (résistance mécanique et module d'élasticité).

En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un liant optimisé à un sol ou matériau particulier et ayant une cinétique de prise ajustée aux conditions climatiques régnant au moment des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier. En outre, des liants hydrauliques routiers peuvent être spécifiquement conçus pour le traitement de certains matériaux particuliers.

■ Plan économique

Les formulations des liants hydrauliques routiers font largement appel à des sous-produits d'industries ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.). Dans certains cas, le producteur joue également sur la finesse de mouture.

Ainsi, d'une manière générale, les prix des liants hydrauliques routiers se situent légèrement en-dessous des prix des ciments « classiques ».

1.2 Domaines d'emploi

Les domaines d'emploi, définis par la série de normes européennes NF EN 13282 (partie 1 et partie 2) sont les suivants :

- **traitement des sols** (Parties supérieures des terrassements P.S. T, remblais, plates-formes supports, couches de forme), conformément au guide technique Setra/LCPC : « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, application à la réalisation des remblais et des couches de forme* » ;
- **réalisation de couches d'assise de chaussée** avec des graves traitées aux liants hydrauliques routiers, conformément à la norme NF EN 14227-5, ou des sols traités en assise de chaussée conformément à la norme NF EN 14227-13, ou des graves hydrauliques à hautes performances, selon la norme française NF P 98 128, et ce suivant les indications données par la norme NF P 98 115 : « *Exécution des corps de chaussée* » et par la série des normes NF P 98 114 « *Méthodologie d'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques* ».

1.3 Limites d'utilisation

Un liant hydraulique routier est spécifiquement formulé pour le traitement des granulats et des sols destinés à la construction routière. **Il ne convient donc pas à la confection des bétons de ciment.**

Aussi, l'utilisation des liants hydrauliques routiers pour le traitement des sols et le recyclage des matériaux nécessite-t-elle de **vérifier au préalable l'aptitude du sol ou du matériau au traitement.**

En effet, la présence, au sein du sol ou du matériau, de certains produits, tels que les **matières organiques**, les **sulfures** (pyrites), les **sulfates** (gypse), ou **chlorures** (sel gemme), est de nature à **perturber ou empêcher la prise du liant hydraulique routier** ou plus gravement à **provoquer des gonflements importants** du sol ou du matériau après traitement.

1.4 Production française

La production française des liants hydrauliques routiers a progressé de façon régulière depuis leur apparition, dans les années 1980, pour atteindre 1,2 million de tonnes en 2007.

2. Constituants

2.1 Constituants principaux

Le liant hydraulique routier anhydre est un mélange intime, réalisé soit avant, soit après broyage d'un ou de plusieurs constituants :

- du *clinker* (cf. article [1]) ;
- des sous-produits d'autres industries (laitiers, cendres volantes) qui subissent, en vue de leur incorporation dans les liants, une sélection et une préparation plus ou moins élaborée ;

- des produits naturels qui, en vue de leur incorporation dans les liants, ne subissent pas d'autre traitement qu'un séchage et une pulvérisation (*fillers*, pouzzolanes naturelles) ;
- d'un activant de prise (chaux généralement).

Ces constituants apportent soit des propriétés :

- **hydrauliques**, c'est-à-dire l'aptitude d'un produit à durcir à froid – non seulement dans l'air, mais également dans l'eau – par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif ;
- **pouzzolaniques**, c'est-à-dire l'aptitude d'un produit à acquérir des propriétés hydrauliques par addition d'un corps réactif qui est généralement « la chaux » ;
- **physiques**, qui améliorent certaines qualités du liant (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité, ...).

Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus ou moins développé. En fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, il existe une grande variété des types de liants hydrauliques routiers. Les constituants principaux doivent être conformes à l'article 4 de la norme **NF EN 197-1** : « *Ciment – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants* ».

Ces constituants sont :

- *clinker* Portland ;
- laitier granulé de haut fourneau ;
- matériaux pouzzolaniques : pouzzolanes naturelles ;
- cendres volantes siliceuses et calciques, (on ne parle plus de cendres silico-alumineuses ni de cendres sulfo-calciques, car la nouvelle désignation ne prend en compte que l'élément dominant de la cendre) ;
- chaux ;
- schistes calcinés ;
- calcaire.

2.1.1 Clinker

Le *clinker* est un produit constitué en majeure partie de silicates et d'aluminates de calcium anhydres, obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation) à une température de 1 450 °C d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %. Ces constituants anhydres formés lors de la clinkérisation sont une combinaison de quatre oxydes variant dans les proportions suivantes :

- la **chaux** CaO (60 à 67 %) ;
- la **silice** SiO₂ (19 à 25 %) ;
- l'**alumine** Al₂O₃ (2 à 9 %) ;
- l'**oxyde de fer** Fe₂O₃ (1 à 5 %).

Le *clinker* broyé est une poudre dont on mesure habituellement la masse volumique, la granulométrie et la surface spécifique (ou finesse).

La masse volumique absolue varie de 3,05 à 3,20 kg/l. La dimension du plus gros grain est de 200 µm. La surface spécifique varie de 2 500 à 4 500 cm²/g.

Le *clinker* est le constituant de base pour la fabrication des ciments et de certains liants hydrauliques routiers à durcissement rapide. Il y a lieu de **rappeler** que les liants à base de *clinker* constituent d'excellents liants hydrauliques routiers pour des travaux en arrière saison ou pour remise en circulation rapide. D'amples détails et figures se trouvent dans le dossier [1] déjà cité.

2.1.2 Laitier

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il renferme principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. C'est un silico-aluminate de chaux formé par la gangue du minerai de fer, les cendres du coke et les additions de fondants divers. On le

recueille liquide vers 1 550 °C à la base des hauts fourneaux (au-dessus de la fonte). À cette température, le laitier liquide est assez fluide, et il peut être évacué par coulée à partir d'un « trou de coulée » situé dans la partie haute du creuset, à la partie inférieure du haut fourneau.

Dès sa sortie, le laitier liquide est refroidi, soit naturellement à l'air (laitier cristallisé), soit par action simultanée de l'air et de l'eau (laitier bouleté), soit encore par action brutale de l'eau (laitier granulé).

C'est le laitier granulé qui est principalement utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques routiers. Il se présente sous la forme d'un sable vitreux 1/5 mm de couleurs variées (blanchâtre, jaunâtre, brunâtre, grisâtre...), d'une densité apparente de l'ordre de 1. Il peut être prébroyé afin d'améliorer sa réactivité.

2.1.2.1 Caractéristiques principales

Le laitier destiné à la fabrication des liants hydrauliques routiers doit être bien vitrifié et avoir une composition chimique convenable comprise dans les limites suivantes :

- CaO : 40 à 50 % ;
- SiO₂ : 26 à 32 % ;
- Al₂O₃ : 12 à 20 %.

La masse volumique absolue du laitier broyé varie entre 2,8 et 2,9 g/cm³. Les grains de laitier se présentent au microscope sous forme de fragments transparents, irréguliers, à cassures anguleuses.

2.1.2.2 Propriétés

Le laitier granulé de haut fourneau doit présenter des propriétés pouzzolaniques (c'est-à-dire que des propriétés hydrauliques se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du liant hydraulique routier.

■ Structure du laitier granulé

Le laitier granulé obtenu par refroidissement brutal, « trempe », garde la structure d'un liquide, c'est-à-dire que les éléments chimiques constitutifs n'ont pas eu le temps de s'organiser en cristaux (forme solide stable) mais restent dispersés.

Cette structure est celle des verres. Le laitier granulé est donc un verre, mais un verre instable qui aura tendance à évoluer vers la forme cristallisée stable. Parmi les causes qui favorisent cette dévitrification, la plus importante est l'action de certaines bases fortes (chaux, soude) qui, sous forme de solutions, permettent la dissolution du verre et sa recristallisation en composés hydratés insolubles.

■ Pouvoir hydraulique et coefficient \propto : réactivité des laitiers vitrifiés

• Pouvoir hydraulique potentiel

Lié à l'aptitude d'un laitier granulé à se dévitrifier et à cristalliser. *A priori*, les laitiers les mieux vitrifiés ont un pouvoir hydraulique potentiel maximal. Mais la composition chimique intervient, la teneur en magnésie et en alumine ayant de l'importance.

Teneur en grains vitrifiés et composition chimique plus basique agissent donc dans le même sens : augmentation du pouvoir hydraulique potentiel. Cependant, pour une marche déterminée du haut fourneau, donc une composition chimique régulière du laitier, la vitrification, et donc les conditions de granulation dont elle dépend, deviennent les éléments qui déterminent la réactivité du laitier.

• Pouvoir hydraulique immédiat

Dépend de l'aptitude d'un laitier granulé à réagir rapidement par dissolution, suivie de cristallisation de produits hydratés moins solubles. Or, l'action d'un liquide sur un grain solide sera d'autant plus rapide et complète que la dimension du grain sera faible.

On retrouve ici cette notion commune, entre autres, à tous les liants hydrauliques ou pouzzolaniques : seuls les grains les plus fins réagissent rapidement et complètement. D'où l'importance de la teneur en fine du laitier granulé (graves laitier et sables laitier).

La friabilité d'un laitier caractérise donc sa réactivité immédiate. Cette friabilité est mesurée par le coefficient α .

2.1.2.3 Processus de prise du laitier granulé

La prise et le durcissement des laitiers sont pratiquement identiques à ceux des liants hydrauliques. De la même façon, il y a dissolution de la phase vitreuse du laitier et formation de silicate et aluminates de calcium hydratés, ainsi que de silico-aluminates de calcium hydratés, ou de chaux selon l'activant utilisé : soude ou chaux. La seule différence résulte de ce que cette dissolution de la phase vitreuse ne peut se faire que dans une solution très basique. La présence d'une base forte appelée « activant », dans les mélanges liés au laitier, est indispensable à leur prise.

Le gypse additionné au moment du broyage joue le rôle d'accélérateur de prise et de durcissement (pour les liants à forte teneur en laitier).

2.1.2.4 Activants de prise

Pour obtenir la dissolution de la phase vitreuse du laitier, il faut la présence d'une solution basique : soude ou chaux. La base la plus commode d'emploi et la moins chère est la chaux (vive ou éteinte).

Il est néanmoins possible d'utiliser d'autres activants comme, par exemple, le gypse sodé, associant gypse (93 %) et soude, ou le phosphogypse sodé (phosphogypse 93 %, et soude 7 %). La soude assure le démarrage du processus de dévitrification par dissolution, et le phosphogypse se combine, à l'état dissous, aux éléments du laitier pour former un composé cristallisé hydraté : « l'ététringite ». C'est un sulfoaluminates de calcium qui cristallise en « pelote d'épingles », ce qui accroît fortement la résistance à terme, sans forcément compromettre la déformabilité.

Les mélanges activés au gypse sodé ont de meilleures résistances en traction et en compression, et gardent une déformabilité intéressante, ce qui leur assure un bon comportement en fatigue.

2.1.2.5 Utilisation du laitier granulé

Le laitier est le constituant primaire le plus utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques routiers. Il y a lieu de rappeler que les liants à base de laitier constituent d'excellents liants hydrauliques routiers, tant pour le traitement des sols que pour la stabilisation de matériaux subnormaux et la fabrication des graves et sables traités aux liants hydrauliques.

2.1.3 Pouzzolanes naturelles

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison des deux, avec parfois la présence d'oxyde de fer.

Les pouzzolanes naturelles sont, en général, des matériaux d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée.

Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

Les pouzzolanes ne sont pas des matériaux homogènes. Elles sont constituées de tous les matériaux projetés lors d'une éruption volcanique, à savoir :

- cendres, éléments les plus fins : 0/2 mm ;

- lapillis, qui ont la même composition, mais sont plus gros : 2/20 mm ;
- ponces, matériaux très alvéolés, donc peu denses ;
- bombes, très denses et dont la taille est supérieure à 50 mm.

2.1.3.1 Caractéristiques principales

Comme tous les liants hydrauliques et pouzzolaniques, les pouzzolanes sont essentiellement composées de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux. Leur composition moyenne varie dans les proportions suivantes :

- silice – SiO_2 : 40 à 54 % ;
- alumine – Al_2O_3 : 12 à 20 % ;
- chaux – CaO : 5 à 12 % ;
- oxyde de fer – Fe_2O_3 : 8 à 16 %.

2.1.3.2 Propriétés physiques et chimiques

Les propriétés pouzzolaniques de certaines roches et, en particulier, des pouzzolanes sont connues depuis l'époque des Romains qui utilisaient parfois dans la construction un liant composé de deux parties de pouzzolanes pour une partie de chaux.

Ce sont d'ailleurs les ingénieurs du laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand qui, dans les années 1970, eurent l'idée d'utiliser les pouzzolanes-chaux comme liant routier.

La couleur des pouzzolanes varie du rouge clair au noir selon leur teneur en oxydes de fer. Pour être utilisée comme liant routier, la pouzzolane se présente sous forme d'un sable 0/3 mm à 0/5 mm qui est élaboré dans une installation de concassage-criblage sans particularité majeure. Ce sable comporte environ 10 à 15 % de fines, sa masse volumique absolue varie entre 2,7 et 3,1, sa densité apparente est supérieure à 1. Le sable de pouzzolane est composé d'éléments durs et abrasifs. Les pouzzolanes sont difficiles à concasser.

2.1.3.3 Phénomène de prise

Les roches pouzzolaniques font prise en présence d'eau et de chaux. La nécessité de la présence de cette chaux pour que le processus de prise (semblable à celui de tous les liants hydrauliques) ait lieu, est la caractéristique principale de tous les liants pouzzolaniques.

La prise des roches pouzzolaniques nécessite donc de la chaux et de l'eau.

Le choix de dosages optimaux en chaux a été étudié au laboratoire régional de Clermont-Ferrand. Ces résultats montrent que la résistance mécanique des mélanges passe par un maximum pour une teneur en chaux voisine de 25 % de la quantité de pouzzolane. Des essais montrent que les résistances augmentent dans le temps, même au-delà de 360 jours. Ceci indique que le liant pouzzolane-chaux est un liant à prise lente. Après un mois de prise, 25 % des performances finales sont atteintes seulement (pour un ciment, après 28 jours de prise, 70 ou 80 % des performances finales sont déjà acquises).

2.1.3.4 Utilisation

La pouzzolane, en raison de ses propriétés physiques et chimiques, est utilisée dans la fabrication de certains liants hydrauliques routiers, comme constituant soit principal, soit secondaire.

2.1.4 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières des centrales thermiques alimentées au charbon pulvérisé ou, plus exceptionnellement, avec du lignite.

2.1.4.1 Propriétés physiques

Les cendres volantes se présentent sous l'aspect d'une poudre fine, douce au toucher, semblable au ciment, dont la couleur peut aller d'un brun crème au gris noir selon leur teneur en carbone imbrûlé, en oxydes de fer, et leur humidité. L'examen au microscope montre qu'il s'agit d'un mélange de particules de forme, de taille et de couleurs variées avec une forte proportion de billes pleines ou de coquilles ouvertes vitreuses, isolées ou accolées, le reste étant des grains anguleux plus ou moins boursoufflés.

La dimension des particules de cendres volantes s'échelonne de 0,5 à 200 μm avec un passant au tamis de 80 μm d'environ 75 à 90 %, et au tamis de 50 μm de 60 à 85 %. La surface spécifique Blaine est le plus souvent comprise entre 2 200 et 4 000 cm^2/g , mais peut atteindre 5 000 à 8 000 m^2/g .

La masse volumique apparente moyenne des grains de cendres volantes varie de 1 900 à 2 400 kg/m^3 , alors que celle de la matière minérale est comprise entre 2 650 et 2 800 kg/m^3 . La masse du mètre cube de cendres volantes sèches en vrac varie, quant à elle, de 550 à 900 kg/m^3 suivant le tassement.

La masse volumique sèche des cendres volantes compactées à la teneur en eau optimale peut aller de 1 100 kg/m^3 à 1 300 kg/m^3 , voire plus.

2.1.4.2 Propriétés chimiques

Les cendres volantes, comme les cendres volcaniques, ont des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux (libérée par le *clinker* ou présente dans le mélange) pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. On peut diviser les cendres volantes produites en France en deux grandes classes :

- **siliceuses** qui représentent plus de 95 % de la production ;
- **calciques** provenant de la combustion des lignites.

■ Cendres siliceuses

Ces cendres se caractérisent par une forte proportion de silice (environ 50 %) et très peu de chaux (1 à 8 %). Les trois éléments prédominants sont la silice, l'alumine et les oxydes de fer dont la somme peut représenter 80 à 90 % de la composition chimique élémentaire :

- silice – SiO_2 : 40 à 60 % ;
- alumine – Al_2O_3 : 20 à 30 % ;
- oxyde de fer et oxyde de titane – $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$: 4 à 15 % ;
- chaux – CaO : 1 à 8 % ;
- oxyde de magnésium – MgO : 1 à 3 % ;
- oxyde de potassium et oxyde de sodium – $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$: 2,5 à 6 % ;
- SO_3 : 0,2 à 2 %.

L'examen minéralogique des cendres volantes siliceuses montre qu'elles sont composées d'une phase amorphe vitreuse qui peut représenter de 65 à 90 % du total. Dans la phase cristalline, une partie de la silice se trouve sous forme de **quartz** ou combinée avec l'alumine pour donner de la **mullite**, et une fraction des oxydes de fer sous forme de **magnétite** (Fe_3O_4) et d'hématite (Fe_2O_3).

Les cendres volantes siliceuses sont pratiquement insolubles dans l'eau (en général, entre 2 et 3 %). Provenant de la combustion incomplète du charbon, on y trouve du carbone dont la teneur est habituellement comprise entre 1 et 8 %.

■ Cendres calciques

Les cendres qui proviennent de la combustion des lignites sont très différentes des cendres siliceuses : elles contiennent plus de chaux et moins de silice. Leur composition chimique est la suivante :

- silice – SiO_2 : 25 à 47 % ;
- alumine – Al_2O_3 : 10 à 16 % ;
- oxyde de fer et oxyde de titane – $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$: 8 à 20 % ;
- chaux – CaO : 12 à 45 % ;

- oxyde de magnésium – MgO : 1 à 2 % ;
- oxyde de potassium et oxyde de sodium – $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$: 2 à 4 % ;
- SO_3 : 5 à 10 %.

2.1.4.3 Prise et durcissement

Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau.

Les cendres calciques de Gardanne sont les seules à avoir les caractéristiques d'un véritable liant hydraulique, faisant prise en présence d'eau.

En raison de leur faible teneur en chaux, les cendres volantes siliceuses n'ont pas de propriétés hydrauliques. En revanche, elles ont des propriétés qui les rapprochent des cendres volcaniques : leur **caractère pouzzolanique**. Comme ces dernières, elles réagissent avec la chaux en présence d'eau, dès la température ordinaire, selon le processus de prise et de durcissement commun aux liants hydrauliques.

L'action pouzzolanique s'exerce lentement, mais elle peut être accélérée par l'emploi d'un accélérateur de prise ou par une élévation de la température. Par exemple, l'attaque sulfo-calci que subissent les cendres volantes siliceuses en présence de chaux et de sulfate de calcium (gypse) a permis de mettre en évidence le rôle d'accélérateur que peut jouer ce dernier composé sur l'action pouzzolanique.

Toutefois, il faut noter que le mélange cendres siliceuses-gypse ne fait pas prise, **la chaux étant indispensable**.

2.1.4.4 Utilisation des cendres volantes

Les cendres volantes, en raison de leurs propriétés physiques et chimiques, sont utilisées dans la fabrication de certains liants hydrauliques routiers, comme constituant soit principal, soit secondaire.

2.1.5 Chaux

La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaires dans des fours droits ou rotatifs à une température variable de 900 à 1 250 °C. On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine (chaux calci que si la roche mère est un carbonate de calcium, et chaux dolomitique si la roche mère est un carbonate double de calcium et de magnésium) et sa teneur en argile. On parle de « chaux aérienne » si la roche de base est un carbonate quasiment pur, et de « chaux hydraulique » si elle contient de l'argile (jusqu'à 20 %). Les chaux résultant directement de la calcination d'un carbonate sont des « chaux vives », celles ayant ensuite subi une hydratation sont des « chaux éteintes ».

Les chaux dolomitiques, disponibles en bien moindres quantités, ne sont, en pratique, pas utilisées, car ayant une réactivité lente et pouvant créer un risque de gonflement dû aux composés magnésiens.

Les chaux, destinées à être utilisées pour la fabrication des liants hydrauliques routiers, doivent être conformes à la **norme NF EN 459-1 (CL, DL, HL, NHL)**.

Elles interviennent dans les liants hydrauliques routiers soit comme :

– « **activant de prise** » pour enclencher la réaction pouzzolanique de certains constituants tels le laitier de haut fourneau. Dans ce cas, la chaux intervient comme une base forte provoquant la dissolution de la phase vitreuse du laitier et la mise en solution de l'alumine, de la silice et de la chaux. Ceux-ci se combinent ensuite pour former des aluminates et des silicates de calcium hydratés, analogues à ceux obtenus lors de l'hydratation des liants hydrauliques ;

– « **activant + réactif** » de la réaction pouzzolanique. Dans ce cas, la chaux intervient d'abord comme une base forte provoquant la dissolution de la phase vitreuse de certains constituants tels les cendres volantes silico-alumineuses ou les pouzzolanes ou les basaltes, et la mise en solution de l'alumine, puis de la silice. Ensuite, elle se combine avec eux pour former des aluminates et des silicates de calcium hydratés, analogues à ceux obtenus lors de l'hydratation des liants hydrauliques.

2.1.6 Schistes calcinés

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

2.1.7 Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits en poudre dont les grains ont des diamètres inférieurs à 80 microns. Ils ont la finesse d'un ciment ou sont encore plus fins. Ils s'obtiennent par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.

2.2 Constituants secondaires

Il est possible d'utiliser, dans la fabrication des liants hydrauliques routiers, des constituants secondaires, dans une proportion n'excédant pas 5 % en masse. Il s'agit de matériaux minéraux naturels, de matériaux minéraux issus des procédés de fabrication du *clinker*, de laitiers issus de la sidérurgie au carbone en filière oxygène ou de constituants spécifiés au § 2.1, spécialement sélectionnés, à moins qu'ils n'entrent déjà dans la composition du liant hydraulique routier comme constituants principaux.

Les constituants secondaires améliorent, après une préparation adéquate et en raison de leur granularité, les propriétés physiques du liant hydraulique routier (telles que l'ouvrabilité ou la rétention d'eau). Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques. Aucune exigence n'est toutefois requise à cet égard.

Les constituants secondaires doivent être préparés correctement, c'est-à-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés et broyés, selon l'état dans lequel ils se présentent après production ou à la livraison. Ils ne doivent pas augmenter sensiblement la demande en eau du liant hydraulique routier, ni diminuer en aucune façon la résistance du matériau traité.

2.3 Sulfate de calcium(Cs)

Au cours de la fabrication du liant hydraulique routier, il est possible d'ajouter aux autres constituants, du sulfate de calcium ou gypse.

2.4 Additifs

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans les paragraphes 2.1 à 2.3. Ils sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés des liants hydrauliques routiers. Il convient que la quantité totale d'additifs ne dépasse pas 1 % de la masse du liant. Si tel est le cas, la quantité doit figurer sur l'emballage et/ou sur le bordereau de livraison.

Les additifs ne doivent pas altérer les propriétés du liant hydraulique routier, ni celles des matériaux traités.

Nota : la fiche technique relative au produit contient l'information concernant les additifs utilisés.

3. Fabrication

Le liant hydraulique routier est fabriqué par mélange et/ou cobroyage d'un ou de plusieurs constituants principaux tels que définis dans le paragraphe 2.1, avec une certaine quantité d'un sulfate de calcium comme le gypse, nécessaire pour réguler la prise.

Outre ces constituants principaux, les **liants hydrauliques routiers peuvent contenir des constituants secondaires et des additifs**.

■ **Les premiers** peuvent être, soit l'un des constituants minéraux tels que définis dans le paragraphe 2.2, soit une autre matière minérale (appelée « *filler* ») choisie et préparée pour améliorer les propriétés physiques du liant : leur teneur est inférieure à 5 % du total (sulfate de calcium et additifs exclus).

■ **Les second**, soit les additifs sont ajoutés pour faciliter la fabrication du liant ou pour améliorer ses propriétés. Leur teneur est inférieure à 1 % en masse pour les liants hydrauliques routiers.

Le mélange est, pour certaines compositions, finement broyé dans des broyeurs à boulets dont la capacité de broyage est d'environ 100 tonnes/heure. On obtient alors le liant hydraulique routier qui est acheminé vers des silos de stockage de grande capacité (environ 15 000 tonnes).

La distribution des liants hydrauliques routiers se fait exclusivement en vrac, et en principe à la base des silos de stockage.

4. Principales caractéristiques

Le liant hydraulique routier se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte, soit sur le « mortier normal » (mélange normalisé de liant hydraulique routier, de sable et d'eau défini par la norme européenne NF EN 196-1).

4.1 Caractéristiques de la poudre

■ Surface spécifique (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un liant hydraulique routier. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de liant (norme européenne NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de liant, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

■ Masse volumique apparente

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1 000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un liant hydraulique routier.

■ Masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150 kg/m^3 suivant le type de liant hydraulique routier.

4.2 Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur mortier normal

■ Temps de début de prise

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille Vicat – aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300 g – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de liant hydraulique routier. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme européenne NF EN 196-3 (voir [1]).

■ Expansion

Elle se mesure suivant un essai normalisé (norme européenne NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du liant hydraulique routier.

■ Résistances mécaniques

Elles sont mesurées sur éprouvettes de mortier normal et caractérisent de façon conventionnelle la résistance du liant hydraulique routier définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure des résistances en compression :

- à 28 jours pour les liants hydrauliques routiers à durcissement rapide ;
- à 56 jours pour les liants hydrauliques routiers à durcissement normal.

5. Prise et durcissement

Le liant hydraulique routier est une poudre minérale qui a la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, des composés hydratés, stables, ayant des propriétés analogues à celles des composés formés par les ciments en présence d'eau.

La prise et le durcissement des liants hydrauliques routiers sont pratiquement identiques à ceux des ciments. De la même façon, il y a dissolution de la phase vitreuse des constituants et formation de silicate et d'aluminate de calcium hydratés, ainsi que de silico-aluminate de calcium hydraté ou de chaux libre hydratée CH dite « Portlandite » (selon l'activant utilisé : soude ou chaux) formant un gel microcristallin à l'origine du phénomène dit de prise.

Ce sont les cristaux de silicate monocalcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux constituants du matériau où ils ont pris naissance, confèrent à ce dernier sa résistance. C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques.

Le matériau durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.

6. Gamme de produits

6.1 Grandes familles de liants hydrauliques routiers (LHR)

Certains liants hydrauliques routiers ont été mis au point pour des graves ou des sables traités, utilisés en assises de chaussée. D'autres l'ont été pour des traitements de sol. Ces liants peuvent, très schématiquement, être classés en fonction de leur destination principale :

- traitement de sols fins ;
- travaux en arrière saison ;
- traitement de matériaux argileux (y compris en substitution du double traitement chaux puis ciment) ;
- traitement de craies ;
- traitement de calcaires subnormaux ;
- travaux de terrassement.

Des informations précises sur les divers liants hydrauliques routiers disponibles peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les produisent.

6.2 Recherche de nouveaux liants

Les sociétés cimentières recherchent continuellement de nouveaux produits afin de mieux répondre aux besoins du marché. Une gamme de plus en plus étendue de liants de composition variée (liant au *clinker*, liant mixte *clinker*-laitier-cendres-chaux) pour traiter les différents types de sols est proposée sur tout le territoire national.

Les différents liants sont regroupés par famille :

- liants hydrauliques routiers à durcissement normal ;
- liants hydrauliques routiers à durcissement rapide ;
- liants à portance immédiate ;
- liants à faible émission de poussière.

La certification récente des liants hydrauliques routiers est un gage supplémentaire de qualité et de régularité pour l'utilisateur.

7. Normalisation

L'encadré 1 rappelle le contexte européen.

Encadré 1 – Historique de la normalisation européenne

Dans une première phase, les liants hydrauliques routiers ont fait l'objet, en France, d'une procédure d'Avis techniques.

Les travaux de normalisation européenne dans le domaine des liants hydrauliques routiers ont débuté dans les années 1990, de façon totalement volontaire, dans le cadre du CEN (comité européen de normalisation), au sein du Comité technique 51 (ciment et chaux de construction). L'objectif des travaux était de rédiger des normes de spécifications de produits.

Une prénorme européenne ENV 13282 a été adoptée en 1999. Celle-ci, dont l'utilisation n'est pas obligatoire, marque un consensus européen sur la définition des liants hydrauliques routiers. De nombreux pays ont alors édité leurs normes nationales pour reprendre très largement, voire totalement, les dispositions de cette prénorme.

En particulier, la France publia en 2000 la norme NF P 15-108 « *Liants hydrauliques – Liants hydrauliques routiers : composition, spécifications et critères de conformité* » qui reprenait le texte de la prénorme européenne en maintenant certains aspects. La même démarche, effectuée simultanément dans les différents pays de l'UE, a permis d'accomplir l'essentiel du chemin vers une norme européenne. Le dernier pas a été franchi avec l'adoption récente de la norme EN 13282 qui comporte deux parties :

- EN 13282-1 : « *Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide – Composition, spécifications et critères de conformité* » ;
- EN 13282-2 : « *Liants hydrauliques routiers à durcissement normal – Composition, spécifications et critères de conformité* ».

7.1 Liants de la norme européenne NF EN 13282

La norme européenne EN 13282 est publiée par l'Afnor sous la référence NF EN 13282 parties 1 et 2 : « *Partie 1 : Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide – Composition, spécifications et critères de conformité* » et « *Partie 2 : Liants hydrauliques routiers à durcissement normal – Composition, spécifications et critères de conformité* ».

Chaque partie de la norme NF EN 13282 est subdivisée en trois rubriques :

- la première partie est descriptive : elle définit les constituants du liant hydraulique routier ;
- la deuxième partie fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;
- la troisième partie est consacrée aux critères de conformité, aux fréquences d'essais et aux valeurs limites.

7.2 Constituants et codification des liants

Les constituants sont codés comme suit :

- *clinker* Portland : **K** ;
- laitier granulé de haut-fourneau : **S** ;
- laitier d'aciérie à l'oxygène : **S_b** ;
- pouzzolane naturelle : **P** ;
- pouzzolane naturelle calcinée : **Q** ;
- cendres volantes siliceuses : **V** ;
- cendres volantes siliceuses de lit fluidisé : **V_a** ;
- cendres volantes calciques : **W** ;
- cendres volantes calciques non éteintes : **W_a** ;
- schiste calciné : **T** ;
- calcaire :
 - avec teneur en carbone organique < 0,5 % : **L** ;
 - avec teneur en carbone organique < 0,2 % : **LL** ;
- chaux aérienne calcique vive : **CL-Q** ;
- chaux aérienne calcique éteinte : **CL-S** ;
- chaux hydraulique naturelle : **NHL** ;
- sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) : **C_s**.

7.3 Exigences

Les prescriptions ci-après ont pour but de vérifier la régularité des fabrications. Elles ne dispensent pas des essais d'aptitude à l'emploi réalisés selon des modalités définies dans les normes relatives aux matériaux traités (graves, sols, etc.).

7.3.1 Exigences mécaniques

La résistance à la compression des liants hydrauliques routiers doit être déterminée conformément à la norme NF EN 196-1, en remplaçant le ciment par le liant hydraulique routier.

Les éprouvettes doivent être préparées, conservées et essayées suivant les spécifications de la norme NF EN 196-1. Les éprouvettes doivent être démoulées 24 h après leur préparation, puis conservées, en attendant l'essai, dans une humidité relative supérieure ou égale à 90 %. S'il s'avère impossible de démouler les éprouvettes après 24 h, on peut les démouler plus tard, à condition de le consigner dans le rapport.

En fonction de la nature du liant hydraulique routier, les résistances mécaniques doivent respecter les exigences des tableaux 1 ou 2.

■ La norme **NF EN 13282-1** : « *Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide – Composition, spécifications et critères de conformité* » correspond aux liants dits « à durcissement rapide ». Quatre classes sont définies sur la base des niveaux de résistance mécanique à atteindre (tableau 1).

■ La norme **NF EN 13282-2** : « *Liants hydrauliques routiers à durcissement normal – Composition, spécifications et critères de conformité* » correspond aux liants dits « à durcissement normal ». Quatre classes sont définies sur la base des niveaux de résistance mécanique à atteindre (tableau 2).

Des informations détaillées figurent dans les fiches techniques des différents LHR disponibles sur le marché ou peuvent être obtenues auprès des sociétés cimentières qui les fabriquent.

Tableau 1 – Résistances mécaniques requises pour les liants à durcissement rapide

Classe	Résistance à la compression (MPa)		
	À 7 jours	À 28 jours	
E 2	≥ 5,0	≥ 12,5	≤ 32,5
E 3	≥ 10,0	≥ 22,5	≤ 42,5
E 4	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
E 4-RS	≥ 16,0	≥ 32,5	-

Nota : les exigences de résistance mécanique de la classe E4 sont identiques à celles de la classe 32,5 N des ciments courants. Par contre, le temps de début de prise doit être d'au moins 90 minutes pour les LHR des classes E2, E3, et E4, à comparer au minimum de 75 minutes pour les ciments de classe 32,5 N. À l'inverse, pour les LHR de classe E4-RS, le temps de début de prise ne doit pas excéder 90 minutes.

Tableau 2 – Résistances mécaniques requises pour les liants à durcissement normal

Classe	Résistance à la compression à 56 jours (MPa)	
N 1	≥ 5,0	≤ 22,5
N 2	≥ 12,5	≤ 32,5
N 3	≥ 22,5	≤ 42,5
N 4	≥ 32,5	≤ 52,5

Nota : pour les 4 classes, le temps de début de prise doit être d'au moins 150 minutes. Ces spécifications – on notera en particulier que les résistances à la compression sont mesurées à 56 jours, et non à 28 jours – correspondent bien à des liants moins « nerveux » que les LHR dits « rapides » et *a fortiori* que les ciments courants.

7.3.2 Exigences physiques

■ Finesse

La finesse d'un liant hydraulique routier doit être déterminée par tamisage, lequel s'effectue conformément à l'article 3 de la norme NF EN 196-6.

Le refus au tamis de 90 µm (% en masse) doit être inférieur ou égal à 15.

■ Temps de début de prise

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille Vicat – aiguille de 1 mm² de section pesant 300 g [1] – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de liant hydraulique routier. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme européenne NF EN 196-3. Suivant les types de liant, le temps de début de prise doit être :

- supérieur ou égal à 150 minutes pour les liants à durcissement normal ;
- supérieur ou égal à 90 minutes pour les liants à durcissement rapide de classes E_i ;
- inférieur ou égal à 90 minutes pour les liants à durcissement rapide de classe E-RS.

■ Stabilité

Elle se mesure suivant un essai normalisé (norme européenne NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. L'essai permet de s'assurer de la stabilité du liant. L'expansion doit être :

- inférieure ou égale à 30 mm sur pâte pure pour les liants à durcissement normal et les liants à durcissement rapide de classe E-RS ;
- inférieure ou égale à 10 mm sur pâte pure pour les liants à durcissement rapide de classes E_i.

Les liants contenant plus de 4 % en masse de SO₃ doivent, en outre, satisfaire à l'essai à l'eau froide décrit au paragraphe 5.3.2.3 de la norme NF EN 459-2.

7.3.3 Exigences chimiques – Teneur en sulfates

La teneur en sulfates, exprimée en pourcentage pondéral de SO₃, et déterminée conformément à l'article 8 de la norme NF EN 196-2, ne doit pas dépasser 4 %.

Les liants ci-après, peuvent avoir une teneur en sulfates inférieure ou égale à 9 % en masse, à condition qu'ils satisfassent aux exigences définies § 7.4.2 :

- liants contenant des schistes calcinés ou des cendres volantes calciques, à condition que la majeure partie des sulfates provienne des constituants principaux ;
- liants contenant plus de 60 % en masse de laitier granulé de haut fourneau.

7.4 Composition

7.4.1 Déclaration de composition

Les constituants d'un liant hydraulique routier, ainsi que leur proportion moyenne dans le produit fini, doivent être déclarés et enregistrés dans la fiche technique de chaque produit par le fabricant. Les constituants à déclarer sont les constituants principaux (§ 2.1) ainsi que le sulfate de calcium (§ 2.3) si la teneur en sulfates (SO₃) du liant hydraulique routier est supérieure à 4 %.

Remarque : lorsque le dépassement de la teneur en sulfates (SO₃) de 4 % provient des constituants principaux (par exemple, cendres volantes calciques ou schistes calcinés), il n'est pas nécessaire de déclarer la teneur en sulfate de calcium.

7.4.2 Exigences

La composition d'un liant doit respecter, pour chacun des constituants, les valeurs déclarées assorties des tolérances absolues données au tableau 3.

Exemple : pour une composition enregistrée comme suit : S 55, K 30, V 10, la composition réelle du liant hydraulique routier se situerait dans les limites suivantes :

- S : 45 à 65 % ;
- K : 20 à 40 % ;
- V : 5 à 15 %.

Tableau 3 – Composition et tolérances enregistrées

Proportion déclarée d'un constituant (1)	Tolérance absolue (1)
> 20 %	± 10 %
10 à 20 %	± 5 %

(1) Valeurs en pourcentage pondéral de liant hydraulique routier.

7.5 Désignation normalisée

Conformément à la norme européenne NF EN 13282, tous les liants doivent être identifiés sur les documents d'accompagnement et sur l'emballage éventuel à l'aide :

- des lettres HRB (pour *Hydraulic Road Binder*) ;
- de sa classe de résistance (E_i ou N_i) ;
- de la notation complémentaire PR s'il s'agit d'un liant à prise rapide ;
- de sa composition nominale en constituants principaux (des tolérances de pourcentages sont définies) ;
- de la présence éventuelle de sulfate de calcium ;
- de la présence éventuelle d'additifs (maximum 1 %) ;
- des symboles correspondant à chacun des constituants (voir § 2.1 et 2.3) et de leur proportion moyenne. Lorsque des ciments, des ciments à maçonner et des chaux, sont utilisés comme constituants, la partie de leur désignation normalisée se référant au type est utilisée comme symbole.

Remarque : les propriétés particulières en rapport avec l'utilisation envisagée, ne figurent pas dans la désignation normalisée, elles peuvent faire l'objet d'une identification sur les bons de livraison ou sur l'emballage.

Voici 2 exemples pour mieux comprendre :

Exemple 1 : un liant à durcissement normal conforme à la norme NF EN 13282-2, de classe de résistance N₂ et dont la composition déclarée est de :

- 55 % de laitier granulé de haut-fourneau ;
- 25 % de cendres volantes siliceuses ;
- 15 % de chaux calcique.

est identifié comme suit : **HRB, N₂, S55, V25, CL15**.

Exemple 2 : un liant à durcissement rapide, conforme à la norme NF EN 13282-1, de classe de résistance E₄ et dont la composition déclarée est de :

- 80 % de *clinker* Portland ;
- 10 % de cendres volantes siliceuses ;
- 10 % de calcaire.

est identifié comme suit : **HRB, E₄, K80, V10, L10, Cs**.

7.6 Critères de conformité

La conformité d'un liant aux exigences des normes NF EN 13282 (parties 1 et 2) (voir **Nota**) doit être évaluée, de façon continue, sur la base d'échantillons ponctuels prélevés aux points de délivrance, conformément à la norme NF EN 196-7, et soumis aux essais conformément à la norme NF EN 196, parties 1, 2, 3 et 6. Les normes NF EN 13282 (parties 1 et 2) donnent les définitions de base nécessaires, définissent les critères de conformité à appliquer, y compris les méthodes d'évaluation, et spécifient les exigences de conformité, y compris les fréquences minimales d'échantillonnage pour chaque propriété à contrôler.

Nota : les normes NF EN 13282 (parties 1 et 2) ne traitent pas du contrôle de réception à la livraison. Il est recommandé que les contrôles de réception effectués à la livraison des liants HRB respectent au moins les critères de conformité spécifiés dans les normes des liants hydrauliques routiers.

7.7 Certification

La plupart des liants bénéficient de la marque CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée NF EN 13282 (parties 1 et 2) et leur permet de circuler librement au sein de l'espace économique européen.

8. Domaines d'emploi

Le domaine d'emploi privilégié de ces liants est le traitement des matériaux destinés à la construction routière. On distingue trois grandes filières d'application :

- traitement des sols en place ou en centrale ;
- traitement des graves en centrale ;
- retraitement en place des anciennes chaussées.

En effet, grâce à la technique du traitement des sols ou des granulats aux liants hydrauliques routiers, il est possible de valoriser des matériaux aux caractéristiques initiales médiocres tels que calcaire, limons, argiles, sables, marnes, matériaux évolutifs, etc. pour les utiliser en ouvrages de terrassements, ainsi qu'en assises de chaussées. Quant aux chaussées anciennes, on peut en retraiter les matériaux aux liants hydrauliques routiers, *in situ*, plutôt que de les évacuer en décharge pour les remplacer par des matériaux neufs.

De plus, ces techniques donnent aujourd'hui d'excellents résultats en termes de performances techniques et économiques, ainsi que de respect de l'environnement.

Le marché annuel des liants hydrauliques routiers se répartit entre les trois filières précitées de la manière suivante :

- traitement des sols en terrassements et assises de chaussées : 950 000 tonnes de liants ;
- traitement des graves et sables en centrale : 200 000 tonnes de LHR ;
- retraitement des anciennes chaussées en place à froid : 50 000 tonnes de LHR.

8.1 Traitement des sols

Traiter un sol avec un liant hydraulique routier, c'est le mélanger plus ou moins intimement avec cet élément d'apport pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique qu'est le compactage et qui peut se superposer au premier.

Encadré 2 – Historique du traitement des sols avec un liant

Cette technique est fort ancienne, déjà utilisée par les Romains dans la construction des voies impériales (empierrement stabilisé avec un mélange pouzzolane – chaux).

Son application sous forme intensive dans le domaine routier a débuté aux États-Unis puis s'est développée en Europe où on l'utilise dans de nombreux pays (France, Allemagne, Belgique, Suisse, etc.).

En France, la première expérience de traitement de limon à la chaux remonte à 1962 et eut lieu dans le Nord selon des méthodes artisanales pour stabiliser une plate-forme routière. À cette occasion, on constata que la portance de la plate-forme avait considérablement augmenté et que la teneur en eau du sol avait baissé.

Mais, la technique des traitements de sols a réellement démarré en France en 1972 avec quelques chantiers d'importance moyenne. Le liant utilisé était la chaux, dont la consommation annuelle dans ce domaine ne dépassait guère quelques milliers de tonnes.

Récemment, et indépendamment de son histoire (voir encadré 2), **cette technique a connu un très fort développement dû essentiellement à deux phénomènes :**

■ Le **premier phénomène** est lié à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant. En effet, alors que les profils géométriques des projets routiers deviennent de plus en

plus contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport est élevé.

À ces impératifs économiques, il convient d'adjoindre un souci fort louable de préservation de l'environnement poussant à limiter la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation ou la prolifération d'exploitations en carrières ou en ballastières qui rompent bien souvent l'harmonie naturelle de nos paysages.

■ Le **second phénomène** auquel est lié le développement du traitement des sols en place repose sur les progrès technologiques réalisés ces dernières années en la matière (figures 1, 2 et 3).

Nous sommes loin actuellement des conditions matérielles de la première expérience réalisée en France en 1962. Les perfectionnements énormes apportés aux matériels d'épandage et de malaxage, et l'augmentation du parc de matériel de traitement, ainsi que sa diversification, ont permis de passer à un niveau beaucoup plus intéressant, tant du point de vue des rendements, que de celui de la qualité du travail réalisé.

■ L'**ensemble** de ces conditions a incité à étendre la technique du traitement à d'autres types de sols que les limons, comme les argiles, les marnes, les matériaux sableux, sablo-graveleux et graveleux, les craies, les calcaires tendres, etc. Parallèlement, de nouveaux liants hydrauliques routiers, mieux adaptés à certains sols que la chaux, ont été utilisés avec succès.



Figure 1 – Vue générale d'un chantier de traitement de sol



Figure 2 – Matériel d'épandage moderne



Figure 3 – Matériel de malaxage perfectionné

8.1.1 Domaines d'emploi du traitement aux liants

L'objectif du traitement des sols aux liants hydrauliques routiers est sensiblement identique à celui du traitement à la chaux car il permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux. En effet, il peut s'appliquer à certains sols, peu ou pas plastiques, dont les teneurs en eau naturelles trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Mais, il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel.

■ C'est pourquoi le traitement des sols aux liants hydrauliques routiers peut convenir pour **permettre une réutilisation** :

- en remblai, plus importante de certains matériaux humides, comme les craies par exemple ;
- en couche de forme et/ou en assises de chaussée de sols comme les sables, certains matériaux graveleux ou sablo-graveleux, plus ou moins pollués, les limons calcaires peu plastiques, certains calcaires et certaines craies, etc.

Les dosages en liant, exprimés par rapport au poids du sol sec à traiter, varient entre 4 et 10 % en fonction de la nature du sol et du liant.

■ Un liant hydraulique routier, mélangé avec un sol, va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour **donner naissance à un certain nombre de constituants hydratés** bien connus dans la chimie des liants hydrauliques. Il s'agit de :

- silicate de calcium hydraté, CSH, provenant des silicates bi et tricalciques ;
- portlandite Ca(OH)_2 ;
- aluminat de calcium C_4AH_{13} provenant du C_3A ;
- sulfo-aluminat de chaux – par réaction du gypse avec le C_3A –, d'abord sous forme d'ettringite, puis sous forme de monosulfoaluminat.

Les liants hydrauliques routiers contenant de fortes teneurs en laitier donnent des constituants un peu différents tels que :

- silicate de calcium hydraté CSH ;
- aluminat bicalcique hydraté AC_2H_7 ;
- trisulfoaluminat de chaux.

■ C'est la croissance des microcristaux formés, leur enchevêtrement, leur feutrage progressif qui donnent au mélange (liant hydraulique routier + sol + eau) une certaine cohésion et une **résistance qui croît avec le temps**. La vitesse et le taux d'hydratation dépendent principalement :

- des constituants des liants hydrauliques routiers ;
- de leur finesse ;
- de la température, etc.

Lorsque le sol est très peu argileux, mais surtout formé de grains comme les sables et les graves, on observe bien au microscope les constituants hydratés du liant qui enrobent et relient les grains entre eux formant des sortes de ponts de plus en plus nombreux et solides, ce qui explique bien que la portance, la rigidité, le module de déformation, la résistance au gel, les résistances mécaniques croissent dans le temps.

■ Les réactions peuvent être un peu différentes dans le **cas d'un sol argileux** car le milieu est plus finement divisé, le pH de la solution modifié. L'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 formé par l'hydratation du *clinker* pourra peu à peu se combiner aux éléments argileux du sol. Dans certains cas, les particules d'argiles pourront ralentir la prise du liant hydraulique en formant autour des grains une enveloppe protectrice.

De ce fait, pour les sols argileux, on préconise un traitement préalable à la chaux dont les actions immédiates permettent d'amener le sol à un état optimal pour le traitement au liant hydraulique. Par ailleurs, comme dans le cas du traitement des sols à la chaux (pour la chaux, il y a abaissement de la teneur en eau du fait de l'hydratation de la chaux et de l'élévation corrélative de température, modification de la plasticité du fait des permutations ioniques, probablement modification de la courbe proctor, puis, progressivement, formation de composants stables par combinaison entre les argiles et la chaux), le liant hydraulique routier incorporé à un sol conduit à une réduction de la teneur en eau du mélange (sol + liant) par suite de l'apport de matériaux secs et de l'aération du sol lors du malaxage.

En revanche, on ne note, ni de modifications géotechniques immédiates notables, ni de modifications importantes de la courbe Proctor.

8.1.2 Avantages du traitement des matériaux aux liants hydrauliques routiers

Ils offrent tout à la fois des avantages techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

■ Techniques

Le traitement aux liants hydrauliques routiers permet l'obtention de matériaux homogènes, durables et stables, présentant des caractéristiques mécaniques élevées. En outre, ces matériaux se caractérisent par une grande rigidité et une excellente tenue à la fatigue. Ils ont un bon comportement par temps chaud sans déformation, niorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit.

■ Économiques

La réutilisation des matériaux en place constitue un facteur d'économie important puisqu'elle réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier, situé au voisinage du chantier.

Enfin, ce sont des techniques très économiques, notamment du fait de la durée plus courte des travaux : l'économie réalisée par rapport à une solution classique est de l'ordre de 30 % environ.

■ Écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge (donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'usager et aux riverains) et de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

8.1.3 Traitement mixte à la chaux et au liant hydraulique routier

Ce type de traitement est essentiellement utilisé en couche de forme et en couches d'assises de chaussées. Il convient plus particulièrement aux sols plastiques, qui sont *a priori* inadaptés au traitement au liant hydraulique, et dont le traitement à la chaux ne permet pas, seul, d'obtenir rapidement les caractéristiques mécaniques requises pour la plate-forme.

■ L'exécution des travaux suit le processus suivant :

- préparation du sol à traiter ;
- épandage du liant (figure 4) ;
- malaxage (figure 5) ;
- compactage (figure 6) ;
- réglage ;
- protection : le produit de cure (figure 7).



Figure 4 – Contrôle de l'épandage du liant hydraulique routier



Figure 5 – Malaxage du sol et du liant pour une plate-forme industrielle

Le traitement préalable à la chaux, par les actions immédiates de celle-ci, permet d'amener le sol à un état optimal pour le traitement au liant hydraulique routier.

■ Les dosages respectifs en chaux et en LHR, exprimés par rapport au poids du sol sec, varient selon la nature du sol comme suit :

- de 1 à 4 % pour la chaux ;
- de 4 à 6 % pour le LHR.

■ Dans certains cas particuliers où le matériau à traiter est trop sec, il peut être nécessaire de procéder à un arrosage avec malaxage, avant épandage du liant, pour réhumidifier le sol. Inversement, on peut procéder à un malaxage sans liant pour profiter des conditions atmosphériques favorables à une évaporation lorsqu'on est en présence de sols humides.

8.2 Traitement des graves

Les graves traitées aux liants hydrauliques routiers sont un mélange composé d'une grave à granulométrie très élaborée, d'un liant hydraulique routier à faible dosage (de 3 à 5 % en poids) et d'eau. Pour l'histoire de son développement, voir l'encadré 3.



Figure 6 – Compactage du sol traité au liant hydraulique routier



Figure 7 – Protection du matériau traité à l'aide d'une émulsion de bitume

Encadré 3 – Historique du traitement des graves

Avec l'accroissement du trafic lourd sur le réseau routier français, au cours des années 1960, les concepteurs routiers ont été amenés à abandonner l'utilisation des matériaux non traités dans les assises de chaussées au profit de matériaux traités aux liants hydrauliques qui offraient l'avantage de pouvoir répartir les charges au niveau du sol de fondation.

Pendant plusieurs années, des recherches ont été effectuées pour :

- la mise au point des critères de choix des graves (granulométrie, dureté, propreté) ;
- l'étude de liants spécialement adaptés pour la confection de graves traitées présentant un délai de maniabilité compatible avec les délais de mise en œuvre ;
- le perfectionnement des centrales de fabrication, des matériels d'épandage, de réglage et de compactage.

Ces évolutions, ainsi que la directive du Setra-LCPC (Mars 1969 et complément d'Octobre 1975) « *Réalisation des assises de chaussées en grave ciment* » ont permis d'asseoir définitivement la technique des graves hydrauliques.

8.2.1 Domaines d'emploi

Les graves traitées aux liants hydrauliques ont été utilisées pour la construction de chaussées neuves ainsi que pour l'entretien des chaussées dégradées (figure 8).

■ Dans le **domaine des chaussées neuves**, les graves traitées aux liants hydrauliques ont été utilisées, soit en couche de fondation, soit en couche de base, soit conjointement en couche de fondation et en couche de base.

■ Dans le **domaine de l'entretien des chaussées**, les graves traitées aux liants hydrauliques ont été massivement utilisées dans le cadre du programme des travaux de renforcement coordonnés mené par la direction des routes sur le réseau national entre les années 1960 et 1990.

8.2.2 Avantages et limites d'emploi

Les graves traitées aux liants hydrauliques routiers présentent les avantages suivants :

- caractéristiques mécaniques élevées après prise et durcissement ;
- accroissement très important de la résistance en fatigue, moyennant un léger surdimensionnement ;
- aucune sensibilité aux variations de température ;
- aucun risque de déformation par orniérage ;
- possibilité d'utiliser des granulats subnormaux, ces derniers étant peu sollicités après prise du liant ;
- intérêt économique.

Mais leur emploi peut être limité pour les raisons suivantes :

- fissuration de retrait thermique qui ne peut être évitée ;
- nécessité d'une épaisseur minimale par couche, même pour un trafic faible (environ 15 cm) ;
- diminution importante de la résistance en fatigue pour un léger sous-dimensionnement.

8.2.3 Fabrication et transport

La fabrication est effectuée dans des centrales de malaxage très perfectionnées et dont le débit peut atteindre 400 tonnes/heure.

Le transport s'effectue par camions bennes. Le temps de transport ne doit pas excéder 30 minutes, afin d'éviter la ségrégation et la dessiccation du mélange. Il peut être nécessaire de bâcher les camions par temps pluvieux ou par temps trop chaud.



Figure 8 – Chantier de mise en œuvre de grave traitée au liant hydraulique routier

8.2.4 Mise en œuvre

La mise en œuvre se fait en plusieurs étapes, faisant ainsi appel à une multitude de matériels d'exécution. Elle suit le processus suivant :

- épandage du matériau ;
- fin réglage ;
- préfissuration ;
- compactage ;
- protection : le produit de cure.

■ Épandage

Il peut être réalisé par différents types de matériels :

- niveleuse ;
- *spreader* ;
- finisseur.

■ Fin réglage

Lorsque l'épandage a été fait par une machine qui n'assure pas le réglage, celui-ci est effectué à la niveleuse après un pré-compactage. Il ne doit pas être réalisé par apport de matériaux, mais uniquement par rabotage.

■ Préfissuration

Cette technique consiste à provoquer (réalisation d'une entaille pour créer une faiblesse dans le matériau) et à localiser les fissures de retrait afin qu'elles n'existent que là où on les désire. Cela permet de réaliser un traitement préventif à cet endroit et d'en multiplier le nombre d'une manière optimale, de sorte que les multitudes de fissures ainsi créées soient aussi fines que possible, avec une faible amplitude d'ouverture de ces fissures à chaque cycle thermique (figures 9 et 10).

■ Compactage

L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage. Deux engins seront nécessaires :

- un rouleau lisse vibrant qui effectue un premier compactage en 8 à 12 passes ;
- un rouleau à pneus d'un minimum de 3 tonnes par roue (5 tonnes pour les matériaux entièrement concassés) qui achève le compactage en 15 à 20 passes.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin de l'opération de préfissuration pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et pour achever les travaux de compactage avant la fin du délai de maniabilité du liant hydraulique routier.



Figure 9 – Préfissuration de la grave traitée au liant hydraulique routier – procédé Olivia



Figure 10 – Préfissuration de la grave traitée au liant hydraulique routier – procédé joint actif

■ Réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Cette opération doit suivre immédiatement le compactage sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués.

L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade de la conception, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (3 cm).

■ Protection du matériau

La protection immédiate est destinée à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du réglage. Elle est constituée généralement par une couche d'émulsion de bitume.

La protection définitive est constituée d'une couche de roulement dont la nature et l'épaisseur varient en fonction de l'importance de la route et du trafic estimé. Cette couche de roulement peut varier entre un simple enduit superficiel pour une route à très faible trafic

à une couche de surface en béton bitumineux d'épaisseur de 6 à 8 cm pour une route à trafic moyen et fort.

8.3 Retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques routiers

Le retraitement en place à froid des chaussées, au moyen de liants, est une technique destinée à recréer, à partir d'une chaussée dégradée, une structure homogène et adaptée au trafic à supporter. Elle consiste à incorporer au sein du matériau, obtenu par fractionnement de l'ancienne chaussée, un liant hydraulique routier (éventuellement un correcteur granulométrique) et de l'eau, puis de les mélanger intimement, *in situ*, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène.

On réalise ainsi, après réglage et compactage, une nouvelle assise de chaussée sur laquelle on applique, soit une couche de surface, soit d'autres couches de chaussée si la partie retraitée ne peut, à elle seule, supporter les sollicitations du trafic.

8.3.1 Avantages du retraitement en place

Le retraitement en place à froid des chaussées aux liants hydrauliques routiers est une technique éprouvée qui offre des avantages techniques, économiques et environnementaux.

■ Techniques

Le retraitement en place aux liants permet de renforcer une ancienne chaussée fatiguée, déformée et inadaptée au trafic qu'elle supporte. Il restitue ainsi une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave hydraulique. En particulier :

- une rigidité qui assure une bonne répartition des charges sur le support de la chaussée et permet une excellente adaptation aux supports de faible portance ;
- une tenue à la fatigue qui permet à la chaussée retraitée de résister très longtemps à la répétition des charges, donc à un trafic cumulé important sous réserve d'un dimensionnement approprié ;
- un bon comportement :
 - à « la chaleur » : le matériau demeure rigide et stable par temps chaud sans déformation, ni orniérage,
 - à l'érosion grâce à la résistance du matériau,
 - aux cycles gel/dégel grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit.

■ Économiques

Ils sont de cinq ordres :

- technique à l'échelle locale : les liants hydrauliques sont disponibles localement et la plupart des entreprises routières disposent des matériels adaptés à ce type de travaux ;
- économie d'énergie : le retraitement au ciment, ou aux liants hydrauliques routiers, est une technique de traitement à froid, utilisant donc peu d'énergie ;
- économie de transport de matériaux : c'est une technique qui valorise les matériaux du site. Elle réduit l'apport de granulats (coût de fabrication et de transport). Elle évite le rehaussement des abords (accotements et trottoirs) ;
- préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier, grâce à la réduction du tonnage de granulats transporté ;
- économie sur les coûts : c'est une technique très compétitive. L'économie réalisée par rapport à une solution classique de renforcement avec épaulement est de l'ordre de 15 à 30 %.

■ Environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge (donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'usager et aux riverains) et de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières et ballastières) et contribue à préserver l'environnement. La technique évite la mise en décharge des matériaux issus de la déconstruction de l'ancienne structure de chaussée (Loi sur la mise en décharge des déchets). Elle diminue la gêne à l'usager et aux riverains (durées du chantier et du transport des matériaux réduites).

8.3.2 Limites de la technique

Elles sont de deux ordres :

- présence de pavés, de structures de béton ou de matériaux trop gros, qui constituent des obstacles pour le passage des machines de retraitement. Les technologies actuelles permettent le retraitement de matériaux dont la dimension du plus gros élément est inférieure à 80 mm ;
- présence de produits qui inhibent la prise des liants hydrauliques (nitrates, sulfures, matières organiques) ou qui génèrent des gonflements (gypse, sulfate).

8.3.3 Description de la technique

■ Retraitement – type

L'exécution des travaux de retraitement des chaussées en place aux liants hydrauliques routiers, intègre différentes opérations faisant appel à une ou plusieurs machines sans que l'énumération suivante corresponde à un ordre chronologique ou à une réalisation obligatoire :

- défonçage de l'ancienne chaussée (figure 11) ;
- remise au profil ;
- correction granulaire éventuelle par apport de matériaux nouveaux, concassage, écrêtage, ou par les trois solutions à la fois ;
- épandage du liant hydraulique routier (figure 12) ;
- humidification éventuelle ;
- malaxage (figure 13).

Les opérations qui suivent ne sont pas spécifiques au retraitement en place et font appel à des méthodes et matériels classiques :

- préfissuration ;
- réglage ;
- compactage (figure 14) ;
- réalisation de la protection superficielle ;
- réalisation de la couche de roulement.

Suivant la technique de retraitement et les matériels employés, ces différentes opérations se regroupent ou s'interpénètrent.

Ce retraitement-type correspond au cas le plus fréquent du retraitement en place. Il est parfois indispensable de procéder à un prétraitement à la chaux quand l'indice de plasticité I_p des matériaux en place est supérieur à 12, ou quand la valeur de bleu de méthylène est supérieure à 2,5.



Figure 11 – Scarification de l'ancienne chaussée

En cas d'élargissement-retraitement, une assise en rive d'épaisseur adéquate doit être construite avant les travaux de retraitement, de préférence avec un matériau semblable à celui qui constitue la chaussée existante.

■ Matériels d'exécution

Le retraitement en place est une technique qui fait appel à une grande variété de matériels. En effet, à chaque opération définie dans le retraitement-type correspondent un ou plusieurs types de matériels. La plupart font traditionnellement partie du matériel de travaux publics.



Figure 12 – Épandage du liant hydraulique routier



Figure 13 – Malaxage du matériau de l'ancienne chaussée avec le liant



Figure 14 – Compactage du matériau retraité au liant

Pour le matériel de retraitement proprement dit, il existe trois types de matériels qui se distinguent par des performances différentes en matière de profondeur d'action, d'homogénéité de traitement et de rendement. Il est, par conséquent, essentiel de bien choisir le matériel adapté au chantier à réaliser, la qualité du résultat obtenu en dépendant de façon considérable. On peut citer, à cet égard :

- le matériel d'origine agricole, tels que les rotobèches, pour le retraitement en place de routes à très faible trafic ;
- le matériel spécifique pour le malaxage en place, tels que les pulvimixeurs, pour tous trafics, quelle que soit la nature du matériau de l'ancienne chaussée (y compris les matériaux traités) ;
- le matériel de reconditionnement des chaussées, spécifique, de conception récente et intégrant, en un seul bloc, toutes les opérations de retraitement des anciennes chaussées qui sont effectuées en continu, sans intervention manuelle, depuis le défonçage jusqu'à l'épandage du produit de protection (figure 15).

Il est à noter que le Guide technique Setra/CFTR sur le « *Retraitement en place à froid des anciennes chaussées* » définit, dans le Livret II – « Liants Hydrauliques », des niveaux de qualité de retraitement (R1 et R2), en fonction des performances mécaniques des matériels utilisés.

Le niveau de qualité de retraitement peut être choisi en tenant compte de la fonction de la nouvelle assise dans la chaussée et du trafic à supporter par la chaussée.

■ Conditions de mise en œuvre

Dans le cas d'un retraitement mixte chaux-liant, il est illusoire d'espérer gagner du temps et de la production en supprimant le prétraitement à la chaux.

Chaque liant a un rôle bien spécifique :

- la chaux floccule les argiles et assèche les matériaux humides ;
- le ciment ou le liant hydraulique routier apporte ensuite une rigidification rapide.

Le matériau retraité à la chaux subit un compactage et un réglage simple à la côte définitive plus une légère surépaisseur (10 % de l'épaisseur de la couche au maximum) pour juger de la bonne répartition du matériau. Le retraitement au ciment, ou aux liants hydrauliques routiers, se fait alors en prenant soin de vérifier, au préalable, que les teneurs en eau sont correctes. Le délai entre retraitement à la chaux et retraitement au ciment, ou aux liants hydrauliques routiers, dépend de l'organisation du chantier. Les deux retraitements sont souvent enchaînés dans la même journée.

■ Épandage

Pour réduire et maîtriser la dispersion du ciment ou du liant hydraulique routier, il est préférable de retenir, dans le cas de chantiers importants, un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite « à la bêche ».

■ Malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur homogène du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur à rotor horizontal ou un atelier compact de reconditionnement.

D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller, lorsqu'on retraits par bandes jointives, à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.

■ Compactage

L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin du malaxage pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et parce



Figure 15 – Atelier de reconditionnement des chaussées ARC 700

que le délai de maniabilité diffère, suivant qu'on utilise un ciment ou un liant hydraulique routier.

■ Préfissuration

(cf. paragraphe 8.2.4).

■ Réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses.

Cette opération doit suivre immédiatement le compactage sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau retraité. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du retraitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (3 cm).

■ Protection du matériau

Elle est destinée à protéger la couche retraitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du réglage.

(cf. paragraphe 8.2.4).

8.4 Conclusion

Le traitement des matériaux routiers et le retraitement en place à froid des chaussées au moyen de liants sont des techniques parfaitement au point. Elles présentent beaucoup d'avantages et, en particulier :

- le traitement à froid (économie d'énergie) ;
- le travail *in situ* (économie de transport de matériaux) ;
- la valorisation de matériaux qui auraient été mis à la décharge ;
- la préservation de l'environnement, car elle limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières et ballastières) ;
- une économie sur le coût global des projets pouvant atteindre 30 %.

Ces techniques qui cumulent les avantages techniques, économiques et environnementaux rencontrent un réel engouement auprès des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre. De plus, l'innovation dont font preuve les fabricants de liants et les constructeurs de matériels et la mise sur le marché de liants hydrauliques routiers adaptés à une plus grande variété de matériaux et de matériels de plus en plus puissants et performants vont permettre à ces techniques de se développer davantage.