

TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE
AU CIMENT - SPÉCIFICATIONS
TECHNIQUES ET RÈGLES DE L'ART

J. VÉCOVEN

Ingénieur Granulats - Matériaux Routiers
DITEC : France, CIOR : RABAT

RESUME

La particularité de cette technique est :

- soit de permettre l'utilisation de matériaux locaux généralement refusés pour une utilisation directe sans traitement,
- soit d'utiliser des matériaux de basse qualité mais avec des épaisseurs inférieures à celle qu'aurait nécessité une utilisation sans traitement.

Cette technique consiste à malaxer en place un sol sur lequel le liant a été répandu, soit directement sur la route si celle-ci est déjà constituée d'un matériau apte au traitement, soit sur un matériau adapté que l'on a apporté sur la route en travaux.

La première étape importante de cette technique est la qualification du sol à traiter. Contrairement à une carrière de granulats, où le matériau est parfaitement défini, un traitement de sol se fait a priori sur un matériau " inconnu " non localisé. Il faut donc qualifier le " gisement " local de sol en: quantité disponible pour les travaux, homogénéité pour définir la ou les grandes familles de sols à traiter et nature (géotechnique et chimique) pour confirmer son aptitude à être traitée.

Cette qualification est primordiale pour assurer la réussite de cette technique ; c'est pourquoi il a été réalisé une classification géotechnique rationnelle des différents types de sols rencontrés. Cette classification est basée sur l'étude des paramètres de nature du sol (granularité, argilosité, fragmentabilité), des paramètres d'état du sol (teneur en eau naturelle, teneur en eau optimum proctor) et de la présence éventuelle d'éléments perturbateurs (gypse, sel).

Une fois définie la ou les grandes familles de sols disponibles, il convient de passer à la deuxième étape qui est l'étude de laboratoire. Elle va permettre de vérifier son aptitude à être traitée et le ou les dosages en produits de traitement tels que chaux et ciment. L'utilisation de la chaux est spécifique au traitement des sols trop humides ou à forte argilosité. L'étude vise à déterminer l'amélioration des qualités de portance du sol après traitement, sa non-sensibilité à l'immersion dans l'eau et ses résistances mécaniques à long terme.

Après avoir défini les taux de traitement, il convient de réaliser le chantier. Dans le cas de travaux de grande taille il est conseillé de réaliser une planche d'essais avant le chantier pour vérifier : la qualité des matériels et des équipes de travaux, les conditions de travail des ateliers de traitement (taux de répandage du liant, profondeur d'action du malaxage et granularité du sol après ce malaxage, nécessité d'ajout d'eau) et les conditions de portance et durcissement du sol traité à différents âges. En effet l'équipe et le matériel de chantier constituent le dernier maillon de la chaîne permettant la réussite d'un chantier de traitement de sol en place :

- stockage du liant sur le chantier
- machine de répandage du liant (épandeur de liant) qui assure la régularité, en transversale et longitudinale, du dépôt du liant sur le sol (un répandage par pose de sacs prépesés sur un sol "pré-quadrillé" est aussi possible pour les petits chantiers),
- machine de malaxage (pulvimixeur) du sol, du liant et de l'eau qui assure un bon mélange des produits et leur éventuelle réduction granulométrique,
- arroseuse à eau,
- ateliers de compactage apte à compacter l'épaisseur de sol traité, - niveleuse permettant le réglage final du sol traité,
- ateliers de répandage de la protection superficielle pour éviter la dessiccation du sol traité.

I - TECHNIQUE DE TRAITEMENT AU CIMENT- QUELLES SPECIFICATIONS ?

Les assises de chaussées et les plates-formes routières peuvent utiliser soit :

- des matériaux naturels qui exigent en général des granulats de qualités géotechniques élevées en particulier dans les assises.
- des matériaux traités au bitume sous forme anhydre ou sous forme d'émulsion. Ces techniques s'adressent essentiellement aux assises avec des granulats de caractéristiques élevées et non argileuses.
- des matériaux traités aux liants hydrauliques. Ce type de traitement est bien adapté à des matériaux de moindre qualité en particulier des sols présentant des fractions argileuses et des granulats tendres. L'utilisation de chaux seule ou avec un ciment permet encore une plus large utilisation des sols argileux.

Les spécificités des techniques utilisant les liants hydrauliques, avec ou sans ajout de chaux ,sont le délai de durcissement, lié à la température du matériau, et le maintien de la teneur en eau.

TRAITER PAR LE CIMENT : QUOI ?

- Les graves calibrées
- Les sables calibrés
- **et les matériaux locaux**

Suivant les utilisations envisagées liées essentiellement au niveau des couches d'assises et au trafic que supportera la future route, différents types de matériaux peuvent être traités au ciment.

- Le premier type de matériau constitué par des graves 0/10 à 0/20 mm appelées graves améliorées au ciment (GAC) constitue le haut de gamme de ces matériaux et permettent avec les GAC de niveau 1 d'atteindre des qualités de béton de ciment. Une qualité GAC de niveau 2 peut s'adapter à la majorité des utilisations tout trafic en couche de base.

- Le deuxième type de matériau que peut traiter le ciment est le sable de granulométrie 0/1 à 0/6,3. Ce type de traitement permet une utilisation optimale des gisements de granulats disponibles. Cependant contrairement aux techniques GAC il peut nécessiter l'usage souvent des correcteurs granulométriques pour améliorer sa stabilité immédiate sous trafic de chantier.

Son utilisation, suivant les taux de ciment sera équivalente à celle des GAC. de granulométrie.

- Le troisième type de traitement concerne l'utilisation de matériaux locaux. On y trouve en particulier la technique de graves valorisés au ciment (GVC). Cette technique permet l'utilisation de granulats de moindre qualité pour constituer, soit des plates-formes pour fort trafic, soit des assises de chaussées pour trafic faible à moyen. Ces techniques utilisent soit le traitement en centrale de malaxage, soit le traitement en place sur le site.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX COMMENT ?

- En centrale de malaxage
- En place avec épandage et pulvimixeur

Ce compte rendu présente un des volets des techniques ciment : Le traitement en place des matériaux locaux avec dosage du liant par machine épandeuse et malaxage en place par pulvimixeur.

I- IDENTIFICATION DES MATERIAUX

A - RECONNAITRE LE GISEMENT

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX IDENTIFICATION

- Gisement → Puissance
- Homogénéité
- Qualification

Le gisement retenu pour le traitement doit être caractérisé par un minimum d'essais géotechniques, suivant le volume des matériaux à utiliser et suivant la connaissance que l'on a de ces gisements. Il convient en particulier de définir la puissance du gisement et son homogénéité. Un indicateur pour estimer la variabilité du gisement et ainsi choisir un échantillon représentatif pour l'étude sera la caractéristique marquante du sol à traiter:

- Pour des sols argileux, choisir l'indicateur IP ou VBS. Avec cet indicateur, on peut tolérer une plage de variation relative de 40 % pour le qualifier d'homogène.

- Dans le cas d'autres sols on peut prendre la densité OPN comme indicateur car il rend globalement compte de la dispersion des caractéristiques géotechniques de matériaux. Avec ces indicateurs, une plage de variations relatives de 6 % est tolérée pour une qualification d'homogène.

Une fois déterminé les gisements homogènes en matériaux, on peut réaliser la qualification complète de ceux-ci.

B - QUALIFIER LE OU LES MATERIAUX CORRESPONDANTS A DES GISEMENTS HOMOGENES

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX IDENTIFICATION: LES ESSAIS

- Granularité (taux de fines, taux de sable)
- Argilosité - **VBS, Tp**
- Etat hydrique - **IPI, OPN** ou **OPM**
- Dureté **LA, MDE** fragmentabilité
- Eléments perturbateurs

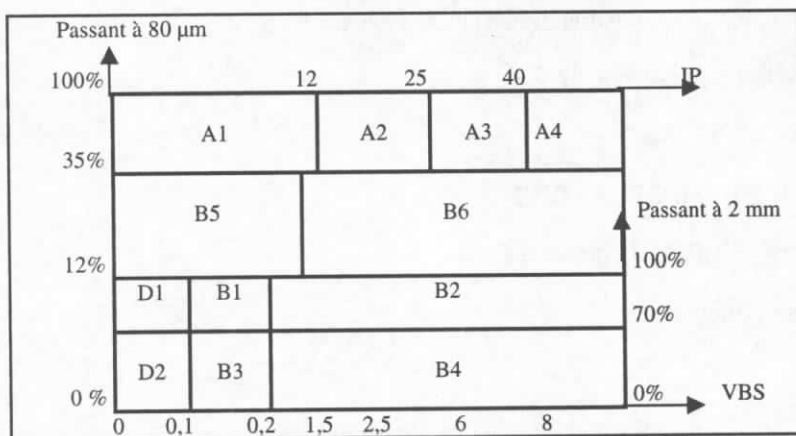
L'ensemble des sols peut être classifié en fonction :

- de leur comportement géotechnique lié essentiellement à trois facteurs, la granularité (teneur en éléments inférieurs à 80 microns, teneur en sable 0/2 et taille des plus gros éléments), l'argilosité estimée par la mesure du bleu de méthylène ou l'indice de plasticité (limite d'Atterberg) et la fragmentabilité des gros éléments (important dans le cas des matériaux rocheux).

- de leur état hydrique qui peut être estimé par la valeur des teneurs en eau naturelle du sol en place, comparé à sa teneur en eau OPN ou par les niveaux de portance (indice CBR immédiat mesuré sans surcharge et appelé IPI) du sol à sa teneur en eau naturelle. Cette identification de l'état hydrique est capitale pour le futur traitement en place. Il permet d'orienter l'étude de laboratoire et d'optimiser les conditions de fonctionnement de l'atelier de traitement

B- I - IDENTIFICATION DES MATERIAUX MEUBLES

Le graphique ci-dessous établit une synthèse des différents types de sols meubles dont le plus grand granulat est inférieur à 50 mm. L'identification du matériau à étudier se fait comme suit :



1er - mesure de la teneur en fine

2ème - mesure du passant à 2 mm

Cette classification est extraite du guide français GTR de 1992. Chaque type de sol identifié par une lettre et un indice (exemple A1, B6 ou D2) correspond à un comportement géotechnique homogène.

Cette qualification doit ensuite être complétée par l'état hydrique du sol en place, particulièrement important pour tous les sols sensibles à l'eau telles que les catégories Aj et Bj. Cette qualification est établie pour S états hydriques:

- Deux états hydriques extrêmes, " th " et " ts ", correspondant en général à des sols impossibles à traiter (un sol " th " est impraticable et exige des apports de chaux élevés, un sol " ts " exige des apports d'eau très élevés pour la prise hydraulique du ciment et sa mise en place).
- Un état hydrique " h " pouvant correspondre à des sols du Nord Marocain, exige souvent l'utilisation de chaux en complément au ciment.
- Un état hydrique " m " correspondant à une teneur en eau naturelle en place équivalente à la teneur en eau OPN qui peut nécessiter parfois, lors d'un traitement par un liant hydraulique, des apports d'eau.
- Un état hydrique " s " qui exige toujours des apports d'eau importants sur le site lorsque l'on pratique un traitement au ciment.

Ces états hydriques sont définis dans le GTR par le positionnement de la teneur en eau naturelle du sol, par rapport à la teneur en eau OPN ou par la valeur IPI

B - 2 - SOLS ROCHEUX

Contrairement aux sols meubles se sont des matériaux massifs en place dans le gisement. Ils nécessitent une réduction granulaire soit par des pelles hydrauliques soit par des socs de bouter.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX IDENTIFICATION SOLS ROCHEUX

- Fragmentabilité - caractères évolutifs
- Nature
- Estimer la réduction granulaire

Ce type de matériau se classifie suivant la nature pétrographique de la roche :

- roche sédimentaire, cette catégorie présente différentes subdivisions car elles correspondent à des comportements différents lors d'utilisation en couche de chaussée traitée ou non traitée.

On trouve dans cette catégorie des matériaux dont le comportement est proche des sols tuffacés (exemple : la craie) .

- roche magmatique

La nature pétrographique est complétée par les caractéristiques mécaniques de la roche qui seront le meilleur indicateur de son évolution granulométrique lors du traitement en place par les machines de malaxage. On utilise en particulier les essais de dureté LOS ANGELES et d'usure micro DEVAL dans l'eau (MDE).

Dans le cas de certaines roches sédimentaires (sol tuffacé ou roche argileuse très fragmentable marne ou schiste) le paramètre teneur en eau complétera la caractéristique de ces matériaux rocheux.

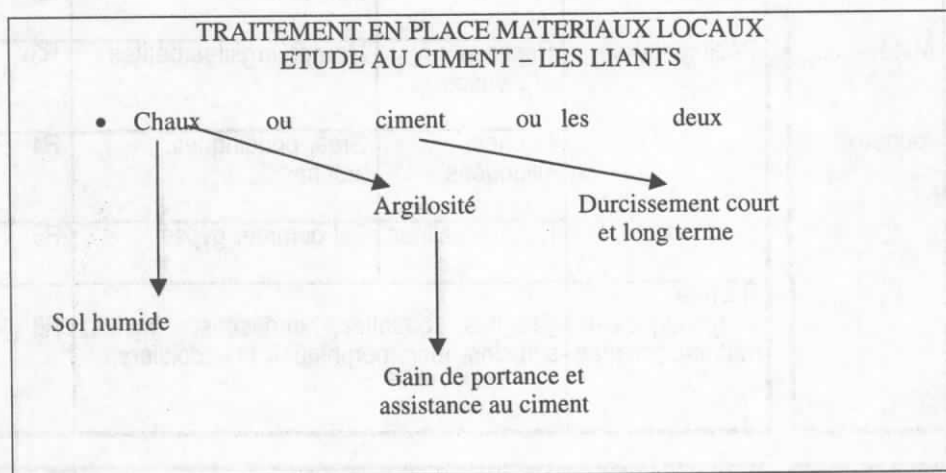
Matériaux rocheux	Roches Sédimentaires	Roches carbonatés	Craies	R1
			Calcaires	R2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pétites...	R3
		Roches siliceuses	Grés, poudingues, brèches...	R4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R5
	Roches Magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes, métamorphiques et ardoisiers...		R6
Matériaux Particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

B - 3 - ELEMENTS PERTURBA TEURS

Pour certains sols la teneur en éléments perturbateurs des réactions de prise et durcissement du ciment doivent être mesurées. Il s'agit en particulier des matières organiques, de sulfures, de sulfates, nitrates (présence d'engrais) ou chlorures (gisement de sel gemme).

La mesure de ces teneurs est à envisager si des risques existent soit naturellement en raison du contexte géologique soit accidentellement du fait d'un site industriel ou agricole.

111- LA CHAUX ET LE CIMENT



A - LES CHAUX AERIENNES

Les chaux sont obtenues par la cuisson de pierres calcaires en four vertical ou rotatif. Le type de four fixe le calibre maximum des pierres et la température de cuisson maximale : 200 mm et 1 150°C pour le four vertical, 50 mm et 1 300°C pour le four rotatif. Suivant la pureté de la roche-mère, on obtient une chaux aérienne vive grasse ou maigre qui durcit lentement à l'air par recarbonatation ou une chaux hydraulique qui durcit rapidement en présence d'eau. Selon la destination, la chaux aérienne vive obtenue est sélectionnée, broyée et criblée.

En ce qui concerne le traitement des sols, la chaux, doit répondre à la norme NF P 98-101. Ses caractéristiques principales sont :

- la teneur en CaO libre ou disponible (oxyde de calcium ou hydroxyde de calcium)

- la finesse de mouture qui conditionne l'homogénéité du mélange sol-chaux, la réactivité à l'eau des chaux vives (détection des chaux surcuites dont l'hydratation est fortement différée avec risque de gonflement du sol-chaux compacté et des chaux recarbonatées à l'air).

B - LES CEMENTS

Les ciments normalisés: la base de la plupart des ciments est le clinker portland. Ce dernier est obtenu par calcination à 1600°C environ de calcaires contenant une certaine teneur en argile ou d'un mélange à proportions ajustées calcaire/matériaux silico-alumineux ; par ajout de produits actifs en quantité variable et de gypse. On obtient après broyage, divers ciments normalisés : les ciments portland, les ciments portland avec ajout (cendres volantes ou pouzzolanes) ; les ciments sont surtout caractérisés par leur classe de résistance (mortier standard à sept jours par exemple). Les ciments, employés pour la construction de routes doivent être conformes à la norme Marocaine NM 10 - 01- F - 004 Les classes utilisées pour ces travaux routiers sont CPJ 35 ou CPJ 45. Lorsque le délai de maniabilité nécessaire la bonne exécution du chantier ne peut être obtenue , il est complété par l'ajout d'un retardateur de prise.

IV- ETUDES DE LABORATOIRE

Deux objectifs sont fixés à l'étude de laboratoire :

- Connaître son comportement sous trafic et au compactage lors de sa mise en œuvre sur le chantier
- Mesurer ses caractéristiques mécaniques à long terme.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX ETUDE AU CIMENT QUE CHERCHE T-ON ?

- Gain de portance immédiate
- Aptitude à être traitée
- Non sensibilité à l'eau
- Résistance mécanique à court et long terme

A - ACTION DES DEUX LIANTS (chaux et ciment)

L'action immédiate la plus importante de la chaux est la granulation du sol caractérisée par la formation de grumeaux stables. Cette granulation est à l'origine des diverses améliorations du sol : augmentation de la limite de plasticité et de la limite de retrait, diminution du retrait, meilleure ouvrabilité et traficabilité, meilleure aptitude au compactage, augmentation de la portance, etc. Cette réaction rapide n'est pas inhibée par une faible teneur en matières organiques [$< 2\%$] et la meilleure hypothèse quant à sa nature semble être la formation de ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ entre les plaquettes d'argile. En plus, une perte d'eau est également obtenue lors du malaxage et pendant le temps de repos préconisé, mais elle est fortement tributaire des conditions atmosphériques (vent, soleil, bruine ou petite pluie...)

L'action à moyen et long terme du ciment consiste essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie par la cristallisation de produits hydratés : c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau et au gel. Comme les réactions pouzzolaniques, la prise hydraulique est très influencée par la présence de certaines substances (inhibition par les matières organiques).

B - CONSISTANCE DE L'ETUDE

Etude de laboratoire

• Quels essais et pourquoi faire ?

- OPN ou OPM-IP1 → portance
- résistance en compression → sensibilité à l'eau ouverture au trafic
- résistance en traction-module → classe mécanique

B- 1 - LA PORTANCE

La première phase de l'étude est la recherche des caractéristiques de portance et l'éventualité de l'utilisation de chaux en complément au traitement au ciment. Pour ce faire il est pratique deux essais proctor, sur le sol naturel d'une part et sur le sol ayant subi son traitement (au ciment ou à la chaux et au ciment) d'autre part. Chaque essai proctor est complété par un essai de portance CBR immédiat (IPI). Pour chaque type de sol une portance IPI est recherchée et fixée en général, supérieure à 20. Les teneurs en eau initiales optimales du sol traité seront comparées aux teneurs en eau naturelle du chantier. Ces éléments seront importants pour l'organisation du chantier : apport d'eau nécessaire, aération du sol préalable, surdosage en chaux.

B- 2 - RESISTANCE A COURT TERME

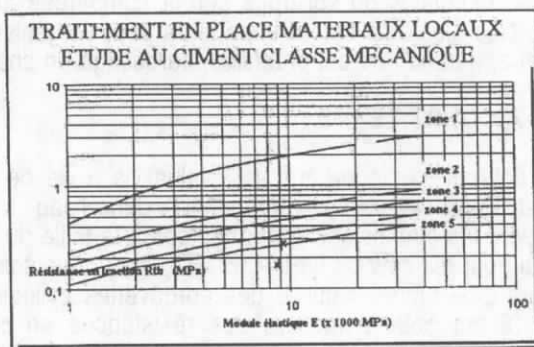
Le comportement du sol traité au jeune âge est évalué vis à vis de l'âge autorisant la circulation du trafic et de sa sensibilité à l'immersion dans l'eau. L'étude est réalisée sur des éprouvettes dont les dimensions sont adaptées à la taille du plus gros élément granulaire. En général pour les sols du type A, B1, B2, D1 ou tous sols ayant plus de 80 % d'éléments inférieurs à 6-3 mm on utilise des éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm pour la mesure des résistances en compression et de hauteur 5 cm pour la mesure des résistances en tractions par fendage. Pour tous les autres sols on utilise des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 20 cm. Celles-ci étant confectionnées sur la fraction granulaire 0/20 du matériau à étudier.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX ETUDE AU CIMENT CLASSE MECANIQUE	
PROPRIETE	CRITERES DE
Ouverture à l'immersion	$R_{ci} / R_c 60 > 0,6$ ou 0,8
Classe mécanique	Supérieur à classe 5 ($R_t = 0,8 \times R_{tb}$)

Les conditions de compactage des éprouvettes sont fixées à 95 % de l'OPM ou 98.5 % de l'OPN et à une teneur en eau WCOPM + 1 ou WOPN

B- 3 – RESISTANCE A LONG TERME

Elle est estimée par la mesure du couple résistance en traction par fendage et module d'élasticité. Ces informations fournissent les capacités mécaniques du sol à résister au cycle de fatigue du trafic. Dans le cas de couche d'assise de chaussée pour voie à faible trafic et un traitement réalisé en place, il faut rechercher la zone mécanique minimum n°4.



V EXECUTION DU CHANTIER

La réalisation des couches de formes en sol traité en place à la chaux et ou au ciment fait appel à un plus ou moins grand nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis et des matériels spécifiques. Il convient de définir à l'occasion de tout nouveau chantier les opérations élémentaires nécessaires ainsi que leur ordre d'exécution.

Parmi les opérations élémentaires on peut citer :

- La **préparation** du sol avec le tri et l'homogénéisation du gisement, une mise en stock éventuelle
- L'**approvisionnement** éventuel du matériau sur le site de traitement

- Le **régalage des matériaux** approvisionnés avant son traitement
- La **fermeture** de surface par un compactage léger d'un matériau traité ou non pour éviter une variation hydrique ou pour préparer la surface à recevoir un traitement.
- Le **préréglage** de la plate-forme en surépaisseur avant un compactage final
- L'**épandage** du produit de traitement
- Le **malaxage** du sol avec son produit de traitement
- Le **compactage** du sol traité soit à une étape partielle (80 % du compactage total) ou soit le compactage final
- La **scarification d'un** sol pour l'ameublir avant le traitement
- L'**arrosage du sol** traité ou à traiter
- Le **réglage final** de la couche de chaussée
- Le **cloutage** de la surface du sol traité dans le cas de sol peu cohésif tel que les sols A et B
- La **protection superficielle** du sol traité par un enduit bitumineux

Suivant les conditions particulières de chaque chantier, les ateliers de traitement des sols sont constitués de tout ou partie des matériels suivants :

- les matériels de stockage des produits de traitement : silos fixes ou mobiles de 20 à 50 t en général ;
- les matériels de préparation des sols : décohesionneurs de sols, engins épierreurs, ramasseurs de pierres, etc ;
- les matériels d'épandage des produits de traitement : épandeurs à matériaux pulvérulents à doseur volumétrique principalement ;
- les matériels de malaxage: à outils fixes (charrues à disques...) pour un malaxage grossier acceptable en remblai, et à outils animés (pulvimixeurs...) pour un malaxage fin, nécessaire en couche de forme ;
- les matériels d'arrosage ;
- les matériels de compactage ;

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER DEMARRAGE

- Le stockage du liant
- Les équipements
 - Epandeur
 - Pulvimixeur
 - Arroseuse
 - Compacteurs
 - Atelier enduit superficiel

- les matériels de réglage des plates-formes : boteurs et niveleuses pour les couches de remblai. niveleuses guidées sur fil ou laser ou des fraiseuses pour les couches de forme
- les matériels de protection superficielle des plates-formes : balayeuses, épandeurs d'émulsion. gravillonneurs.

A - PLANCHE D'ESSAIS

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER - planche d'essai

- modalités de travail de l'atelier de
- préciser le nombre de passes de pulvimixeur
- définir le fonctionnement des compacteurs

-à faire en renforçant les contrôles :

- taux de liant
- teneur en eau
- densité

La réalisation d'une planche d'essais va permettre de définir les modalités de fonctionnement de l'atelier de traitement complet, en particulier :

- la nécessité d'apport d'eau sur le chantier,
- le nombre de passes d'épandeur de liant, compatible avec les capacités de celui-ci.
- le nombre de passes de la machine de malaxage (pulvimixeur), pour juger de l'homogénéité du traitement, de la profondeur de malaxage et de la mouture du sol traité (estimée visuellement),

- établir le nombre de passes des différents compacteurs pour conduire à la densification maximale du sol traité en fond de couche ainsi qu'à une bonne fermeture de surface

C'est pendant la planche d'essais que l'on effectuera des contrôles renforcés sur le taux de liant épandu et sur la densité finale en place. A la suite de cette planche d'essais on pourra arrêter les conditions de fonctionnement de l'atelier de traitement.

B - EPANDAGE DU LIANT

Avant d'épandre le liant il convient de le stocker sur chantier. Le stockage des produits de traitements livrés en vrac, peut être réalisé sur chantier dans des silos. Cela permet de disposer d'une réserve suffisante pour absorber les aléas d'approvisionnement du chantier et de laisser au produit un temps de repos, qui permettra un écoulement stable lors de l'épandage. Il est souhaitable, en particulier dans le cas de gros chantiers, de disposer d'une capacité de stockage correspondant à un à deux jours d'activité. Les silos habituels ont une capacité variant de 25 à 100 tonnes.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER - l'épandeur

- réceptionner le matériel
 - dosage volumétrique asservi à vitesse de l'épandeur
 - capacité dosage (50 kg / m² en 1 passe)
 - mesurer la précision de l'épandage

contrôle de la teneur en liant

Le traitement en place des sols se fait à l'aide d'épandeur alimenté avec des liants livrés en vrac. L'épandage " au sac " ne peut s'envisager que sur de petits chantiers à faible trafic.

Il convient d'insister sur l'importance de l'épandage du liant pour garantir la précision du dosage. La quantité de liant à répandre peut être calculée suivant la formule ci-dessous:

$$Q = e \times \rho \times \frac{d}{100 - d}$$

- Q Masse de liant à épandre (kg/m²)
 D Dosage recherché obtenu lors de l'étude de laboratoire (l %)
 E Epaisseur du sol à traiter
 r Masse volumique sèche du sol en place

L'épandage du liant doit se faire sur toute la surface à traiter par bandes parallèles se recouvrant de 10 cm. La précision de l'épandage doit être estimée lors de la planche d'essais. Elle consiste à calculer le coefficient de variations de la masse de liant mise en place par l'épandeur. Cette opération s'effectue en positionnant des bâches de 1 m par 1m sur une surface d'environ 1000 m². Après passage de l'épandeur chaque bâche sera prélevée et pesée en ne conservant qu'une partie du liant (correspondant à un cadre d'un demi m²). Des l'ensemble de ces pesées on en extrait le coefficient de variation de la fonction de l'épandage

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER - contrôle teneur en liant

- utilisation de plusieurs bâches de 1 x 1 m réparties sur le chantier en (en transversal, en longitudinal)
- calcul du coefficient de variation de l'épandeur

$$CV = \frac{\text{écart-type}}{\text{masse moyenne répandue}} \times 100$$

Comme indiqué dans le cadre ci-dessus. La précision de l'épandage doit être telle que ce coefficient de variation soit inférieur à 10 %, et que l'exactitude (écart entre la valeur moyenne de la masse de liant répandue et celle visée par les calculs) soit inférieure à 5 %.

C - MALAXAGE DU SOL EN PLACE

Le malaxage en place du sol utilise en général des pulvimixeurs à arbres horizontaux. Ces appareils permettent un mélange sol plus liant dont l'homogénéité est proche de celle obtenue dans une centrale de fabrication. Ces appareils ont de plus l'avantage sur les centrales de pouvoir malaxer des sols argileux et humides. Chaque passe de malaxeur se fera par bande parallèle, chaque bande ayant un recouvrement de 10 cm. Il conviendra en général de limiter la dimension maximale des éléments constitutifs du sol. On se limitera à une taille maximale de 50 mm, dans le cas où ces éléments blocaux sont des roches non évolutives. Dans le cas contraire (roche carbonatée tendre, sol tuffacé) le pulvimixeur aura pour rôle de réduire les gros éléments.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER - le pulvimixeur

- c'est l'outil de malaxage :
 - capacité de traiter en profondeur, régulièrement
 - capacité de réduire la granularité du sol :
finesse de mouture 
nombre de passes

Les points à maîtriser lors du malaxage en place sont :

- L'épaisseur du sol traité qui devra être conforme au dimensionnement envisagé et régulière au cours du temps. Cette épaisseur est mesurée avec une pige que l'on enfonce jusqu'au sol naturel tassé correspondant à la profondeur d'action du pulvimixeur. On travaille en général avec des épaisseurs de 30 à 40 cm.

- La finesse de mouture c'est à dire la granularité apparente sous laquelle se présente le sol traité après le passage du pulvimixeur. Cette mouture dépend à la fois du pulvimixeur et de l'état du sol. Plus les matériaux sont argileux et humide, plus la mouture sera grossière et nécessitera plusieurs passes de malaxage (jusqu'à trois). Dans le cas des sols rocheux évolutifs (sol tuffacé) la mouture sera estimée par le taux de réduction de la roche. On recherche en général l'obtention d'une grave 0/40 ayant 30 à 50 % minimum de sable 0/5.

Il est souvent nécessaire de corriger la teneur en eau du sol traité. La présence d'une arroseuse sur le chantier est donc obligatoire. Elle sera utilisée pour faire des corrections de teneur en eau limitée en général à un apport maximal de 5 %. Pour assurer une bonne homogénéité de l'humidification l'eau sera répandue sur un matériau scarifié pour faciliter sa pénétration.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX
LE CHANTIER - ajustement teneur en eau

- présence sur le chantier d'une arroseuse
- point IMPORTANT dans le cas de traitement avec un ciment
 - compactage optimal
 - eau mobilisée par la prise du ciment
- se fait pendant la phase de malaxage

Pour des gros apports d'eau on pourra pratiquer l'arrosage en plusieurs séquences (dès que l'apport d'eau est supérieur est 2 %). Un temps d'attente de 1/2 heure à plusieurs heures sera respecté entre chaque séquence. En fin d'arrosage on pratiquera une nouvelle passe de pulvimixeur.

D - COMPACTAGE DU SOL TRAITE

Le compactage constitue une phase majeure du chantier. Il sera réalisé en totalité (compactage partiel et compactage final après réglage) dans le délai de maniabilité du sol traité.

Compte tenu des épaisseurs de couches de sol traité (30 à 40 cm) il conviendra de disposer de compacteurs puissants.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAI~X LOCAUX

LE CHANTIER - compactage

phase majeure du chantier

- compacteurs lourds vibrants et à pneus

Efficace en fond de couche	Efficace en surface
- recherche densité > 95% OPM	

Deux types de compacteurs seront à utiliser :

- compacteur vibrant lourd dont le rôle principal est le serrage du matériau traité en fond de couche. Ce type de compacteur exigera cependant une surveillance particulière avec certains sols fins (B1, D1, B2, B5, A1). Il peut avec ces sols conduire au phénomène de " feuilletege ".

- compacteur à pneumatique lourd dont le rôle principal est le compactage de surface et la limitation des phénomènes de feuilletege, et en particulier ils sont destinés à réaliser le compactage final après le réglage final.

Comme indiqué ci-dessus le feuilletage peut être rencontré lors du compactage de certains sols traités. Il apparaît en surface sur quelques centimètres. Une façon efficace d'éliminer cette zone feuilletée et la réalisation systématique d'une surépaisseur de sol traité (environ 4 à 5 cm) qui sera éliminée lors du réglage final de la couche après les opérations d'épandage, malaxage et compactage partiel (80 % du compactage total).

E - CLOUTAGE ET PROTECTION FINALE DU SOL TRAITE

Cette opération est destinée à renforcer la cohésion superficielle de certains sols traités. Cela concerne tous les sols fins (A et B5, B6) et certains sols rocheux carbonatés (R12, R13 et les sols tuffacés) qui conduisent à des surfaces très fermées après compactage. Ce cloutage va aussi permettre de favoriser l'accrochage de l'enduit superficiel dont le rôle est :

- de protéger le sol traité de la **dessiccation**, **point crucial** pour les techniques utilisant le ciment dans les pays chaud ;
- de permettre le trafic du chantier avant de recevoir les couches de chaussées suivantes ;
- de constituer la couche de roulement final de la route si la technique du traitement de sol est réalisée pour une voie rurale à faible trafic.

TRAITEMENT EN PLACE MATERIAUX LOCAUX LE CHANTIER - protection superficielle

- maintient de l'état hydrique
 - augmentation résistance de surface au trafic
 - rôle de couche de roulement
-
- **cloutage si sol sableux**
 - **enduit superficiel à l'émulsion de bitume adapté au trafic futur**

La protection superficielle finale du sol traité sera un enduit superficiel à l'émulsion cationique de bitume dans le cas où cette protection est la couche de roulement finale de la route on choisira la technique de l'enduit bicouche. Dans tous les cas avant la réalisation de l'enduit un arrosage fin sera réalisé sur le sol traité pour maintenir l'humidité et favoriser l'accrochage de l'enduit.