

Traitement des matériaux

par **Pierre ROSSI**

Docteur en géologie.

Responsable géotechnique de l'unité « Grands Travaux de Terrassement (Razel) »

Ludovic GAVOIS

Directeur du service géotechnique (GTM Terrassement)

et **Guy RAOUL**

Ingénieur de l'École spéciale des travaux publics,

Ancien directeur de GTM Construction, coordinateur de ce dossier

1. Préambule	C 5 362 — 3
1.1 Développement des techniques de traitement	— 3
1.2 Domaines d'application	— 3
1.3 Guide technique GTS	— 3
2. Matériaux aptes au traitement.....	— 4
2.1 Sols	— 4
2.2 Roches (classes R)	— 4
2.3 Sols organiques et sous-produits industriels (classe F).....	— 4
2.4 Paramètres à prendre en compte dans les traitements	— 5
3. Produits de traitement	— 5
3.1 Chaux aérienne	— 5
3.2 Liants hydrauliques	— 6
3.3 Eau	— 6
4. Traitement à la chaux vive.....	— 6
4.1 Actions de la chaux vive	— 6
4.2 Utilisation des traitements à la chaux.....	— 7
5. Traitement aux liants hydrauliques.....	— 7
5.1 Action des liants hydrauliques	— 7
5.2 Traitements au ciment.....	— 7
5.3 Traitements aux liants hydrauliques routiers (LHR)	— 8
5.4 Utilisation des traitements aux liants hydrauliques	— 9
6. Traitements mixtes chaux – liants hydrauliques	— 9
7. Matériels de traitement.....	— 9
7.1 Matériels de stockage.....	— 9
7.2 Épandeurs	— 9
7.3 Malaxeurs.....	— 9
7.4 Arroseuses	— 10
7.5 Compacteurs.....	— 10
8. Protection de l'environnement et sécurité	— 10
9. Études de traitement	— 11
9.1 Études de traitement des matériaux mis en remblai.....	— 11
9.2 Études de traitement des matériaux mis en couche de forme	— 14
10. Techniques de réalisation des traitements. Contrôles	— 16
10.1 Techniques de réalisation des traitements	— 16
10.2 Contrôles	— 16
Pour en savoir plus	Doc. C 5 362

La technique du traitement des sols est utilisée en France depuis les années 1960.

Jusqu'aux années 1970, elle a essentiellement intéressé la réutilisation en remblai des sols sensibles à l'eau et/ou humides, notamment lors de la réalisation des grands chantiers des programmes d'autoroutes de liaison dans le Nord, l'Est et l'Ouest de la France, et de la construction de pistes et d'aires de l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle (figure A).

Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de forme, en commençant par la réutilisation des sols fins, plus particulièrement des limons, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux comme les graves argileuses, voire les mélanges de sols fins avec des éléments blocailleux ou des graves naturelles.

Dès 1972, un premier guide est élaboré par le LCPC et le Setra : « Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux ».



Figure A – Traitement de remblai à la chaux [A36 – Beaune-Dôle (1979)]

Le guide technique GTS « **Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Application à la réalisation des remblais et des couches de forme)** », guide existant le plus complet en la matière (édité en 2000) est le complément cohérent du guide GTR, tous deux élaborés par le LCPC et le Setra. Comme le GTR, il a été mis au point avec la participation de différents intervenants de la profession (ingénieurs des CETE, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entrepreneurs de terrassement).

D'autres guides ou spécifications sont également à citer :

- « catalogue des structures types de chaussées neuves » 1998 (LCPC et Setra) ;

- référentiel Génie civil LGV en cours de révision par la SNCF ;
- spécification technique n° 590.B éditée en 1999 (SNCF) ;
- guide technique « Manuel de conception des chaussées d'autoroutes » réédition en 2005 (Scetauroute) ;
- manuel de conception des plates-formes autoroutières édité en 1998 (Scetauroute).

Soulignons, de plus, que des spécifications techniques particulières sont définies dans les marchés de travaux.

Le présent dossier « *Traitement des matériaux* », à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, constitue le troisième volet de l'ensemble « *Matériaux* » de la rubrique « **Terrassement** », après celui concernant les « *Propriétés des matériaux naturels* » [C 5 360] et celui concernant la « *Classification des matériaux* » [C 5 361].

De la même manière que le dossier [C 5 361] s'appuyait sur le guide technique GTR pour présenter la classification des matériaux, nous avons basé le présent exposé sur la référence au guide technique GTS.

1. Préambule

1.1 Développement des techniques de traitement

Nous avons souligné, dans les dossiers précédents, l'impact économique important des techniques de traitement à la chaux et aux liants hydrauliques. Cette méthodologie participe fortement à la valorisation des ressources en matériaux du site.

Les avancées de ces techniques sont constantes, se basant principalement sur les composantes suivantes :

- l'évolution rationnelle des méthodologies ;
- la meilleure connaissance de la nature et du comportement des matériaux, s'appuyant sur des études approfondies, des essais représentatifs et sur les retours d'expérience des chantiers ;
- l'utilisation de nouveaux liants hydrauliques, spécialement adaptés au traitement de différentes classes de matériaux ;
- les progrès enregistrés sur les matériels, en matière de malaxage, de précision de dosage et de guidage et, également, les progrès accomplis sur la maîtrise de la teneur en eau.

1.2 Domaines d'application

Le développement des techniques de réalisation des traitements s'applique aux ouvrages en remblais (corps de remblai et parties d'ouvrages particulières), aux plates-formes supérieures de terrassement (PST), aux couches de forme, voire à d'autres couches de chaussées (couches de fondation notamment).

Le domaine d'activité le plus concerné est celui des infrastructures routières et autoroutières. Les techniques de traitement se sont développées également dans le domaine ferroviaire, à l'occasion de la construction des infrastructures TGV, à partir des années 1980 (TGV Atlantique rencontrant des terrains à dominante sols fins et sableux). D'autres applications importantes interviennent sur les aéroports (Roissy comme nous l'avons dit dans l'introduction, Vatry plus récemment), sur des plates-formes portuaires, sur des plates-formes industrielles ou logistiques.

Très peu d'applications sont connues dans les ouvrages en terre d'aménagements hydrauliques (endiguements, canaux, barrages...). CNR a réalisé, à la fin de ses aménagements du Rhône, des essais de traitement de digue, à notre connaissance dans l'optique

du projet Rhin-Rhône, projet qui, finalement, n'a pas vu le jour. EDF a récemment conçu des parties supérieures de digues (réhausses) en matériaux traités à Belleville-sur-Loire. Nous classons à part la réalisation de barrages en BCR (bétons compactés au rouleau), car les graves traitées qui les constituent sont plus proches des qualités des bétons.

1.3 Guide technique GTS

Le guide fournit des précisions sur :

- la nature et la qualité des études de traitement à mener en fonction de la destination des matériaux à traiter ;
- les techniques de mise en œuvre et de réception.

Dans l'exposé qui suit, nous évoquerons les principaux domaines traités dans le GTS, notamment :

- les notions relatives à la technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, en explicitant le rôle de la chaux et des liants hydrauliques ;
- l'application du traitement des sols dans la réalisation des remblais, en précisant son importance au niveau de la PST ;
- le traitement des sols en couche de forme.

Pour ce qui concerne le matériel nécessaire au traitement des sols, des renvois au GTS largement illustrés dans ce domaine sont proposés. Il en est de même pour le suivi du contrôle des travaux de traitement, dont l'importance augmente de jour en jour au fur et à mesure que se développe la technique de traitement des sols.

De la même manière que pour le GTR (cf. [C 5 361]), nous avons privilégié une présentation synthétique du GTS accompagnée de commentaires ou de compléments d'informations sur les sujets qui sont peu développés par le guide, notamment le traitement des roches (classes R) et des sous-produits industriels (classes F).

Notre exposé est peu approfondi sous l'angle de l'utilisation des matériels et des techniques de réalisation des traitements, car nous revenons largement sur ces sujets dans « *Réalisation des ouvrages en terre* » qui traite du matériel et de l'exécution des chantiers.

2. Matériaux aptes au traitement

2.1 Sols

Les classes de sols définies par le guide GTR sont les suivantes (cf. [C 5 361]) :

- A : sols fins ;
- B : sols sableux et graveleux avec fines ;
- C : sols comportant des fines et des gros éléments ;
- D : sols insensibles à l'eau.

Le traitement est indiqué pour la plupart des sols des classes A, B et C, dans certaines conditions (élimination des gros éléments). Les sols de classe D peuvent nécessiter un traitement aux liants hydrauliques pour être utilisés en couche de forme.

2.2 Roches (classes R)

Le GTS n'aborde que très peu le traitement des roches, mis à part les craies. Cela s'explique par un faible retour d'expérience sur les possibilités de traitement des autres matériaux.

Au stade actuel, le traitement de certaines roches, lorsqu'elles constituent les ressources potentielles du site du projet, peut être envisagé. Il doit faire l'objet d'études spécifiques approfondies et menées avec prudence, en vérifiant en premier lieu l'aptitude des roches à se fractionner au moyen des matériels disponibles sur les chantiers.

Il convient d'être particulièrement vigilant lorsqu'il s'agit de roches compactes à caractère évolutif. Les expériences dans ce domaine sont engrangées au cas par cas.

■ Remarque concernant l'utilisation de craies traitées citée par le GTS

Nous attirons l'attention sur la nature et le comportement variables de ces matériaux et leur grande sensibilité aux variations de teneur en eau.

Les opérations de malaxage des craies avec les liants sont délicates ; il peut subsister des parties de couches non traitées, pas toujours détectables par les contrôles effectués. Il faut veiller à la qualité de ces opérations, car des défauts de malaxage permettent l'infiltration d'eaux de ruissellement et peuvent être à l'origine de désordres de tenue de remblai ou de couche de forme. Dans le Nord-Est de la France, certaines sections d'autoroutes ont été construites sur des terrains à forte proportion de craies. Des désordres ponctuels importants ont dû être réparés notamment sur l'autoroute A5 près de Troyes.

Nota : un guide édité en 2005 par les membres du CER de la région Champagne - Ardenne, « *Guide technique d'emploi de matériaux locaux* », traite essentiellement des craies et gravelluchés.

■ Exemples d'autres roches utilisées en remblai ou en couche de forme après traitement :

- pélites, roches argileuses formées par l'érosion des socles primaires, rencontrées dans le Massif Central. Ces roches ont été utilisées, après traitement, lors de la réalisation de l'autoroute A89 Clermont-Ferrand-Bordeaux ;
- mollasses, roches du tertiaire ou du quaternaire ;
- marnes, roches argileuses également utilisées lors de la construction d'autoroutes dans l'Est, et des autoroutes A41 et A51 de part et d'autre de Grenoble notamment ;
- schistes, dont le traitement est particulièrement délicat à opérer, en raison de la présence de minéraux en paillettes (micas, par exemple), qui empêche la prise du liant.

2.3 Sols organiques et sous-produits industriels (classe F)

Le guide GTS n'évoque également que les matériaux pour lesquels les retours d'expériences sont suffisants, en l'occurrence les cendres volantes (classe F2). Signalons que d'autres matériaux de classe F peuvent être utilisés, après traitement aux liants hydrauliques, en remblai ou en couche de forme, plus rarement.

La même prudence que celle recommandée pour les roches argileuses et évolutives est à observer. L'aptitude au traitement doit être vérifiée au cas par cas et des études spécifiques seront entreprises.

De nombreux chantiers sont réalisés en utilisant et valorisant les ressources de résidus industriels de la région concernée.

■ Tout d'abord, les **cendres volantes silico-alumineuses**, citées par le GTS. Elles proviennent de la combustion du charbon des centrales thermiques d'EDF situées en majorité dans les régions du Nord et de l'Est, qui bénéficient d'une grande expérience en la matière. À noter que le compactage des cendres traitées est techniquement difficile à obtenir (concentration de « billes » entraînant un phénomène de fluage).

■ Les **mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM)** qui font l'objet de guides d'utilisation élaborés par la SPRIR (Syndicat professionnel de l'industrie routière) et des laboratoires régionaux des Ponts et chaussées (LRPC) :

- Île-de-France « *Utilisation de MIOM* » édité en 1998 ;
- Haute-Normandie « *Utilisation des sous-produits* », édité en 2000.

■ Les **schistes houillers** qui sont des matériaux stériles mis en dépôt sur les sites d'exploitation des mines de charbon. On distingue :

- les schistes rouges (cuits) utilisables, sans traitement, en remblai ou en couche de forme ;
- les schistes noirs utilisables, éventuellement, après traitement, en remblai essentiellement, pour la construction de routes et de plates-formes industrielles, que l'on emploie parfois avec certaines précautions principalement dans les régions Nord et Est. Un exemple récent (figure 1) est la réalisation en 2002 de la plate-forme de Dourges (utilisation de schistes noirs traités aux liants hydrauliques routiers). L'expérience des chantiers réalisés montre que l'emploi de ces matériaux est toujours délicat. Les vérifications d'aptitudes de ces matériaux doivent porter, en priorité, sur la teneur en soufre et en matières organiques.



Figure 1 – Train de traitement aux liants LHR de schistes houillers [plate-forme logistique delta 3 de Dourges (2002)]

■ **Les résidus d'exploitation de mines de potasse** en Alsace, qui font l'objet d'études de traitement, non concrétisées jusqu'à présent, à notre connaissance.

2.4 Paramètres à prendre en compte dans les traitements

Nous citons essentiellement ceux qui concernent les sols. Ils sont de trois types, définis par le GTR, comme nous l'avons vu dans le dossier [C 5 360].

Les paramètres d'identification considérés comme représentatifs vis-à-vis du traitement sont les suivants.

2.4.1 Paramètres caractérisant la nature des sols

■ Argilosité

Elle s'exprime par l'une des valeurs ci-après :

- l'indice de plasticité (I_p) mesuré suivant la norme NF P94-051 (cf. [Doc. C 5 360]) ;
- la valeur au bleu de méthylène (VBS) mesurée suivant la norme NF P94-068 (cf. [Doc. C 5 360]).

L'argilosité intervient notamment dans le choix du produit de traitement et conditionne la nécessité ou pas de réaliser un prétraitement à la chaux dans le cas d'un traitement mixte.

Soulignons que la chaux est la plus appropriée pour le traitement de matériaux dont l'argilosité est élevée (remblais et PST, voire couches de forme).

■ Granularité

Elle est déterminée par l'analyse granulométrique (normes NF P94-056 et 057) et, plus particulièrement, par :

- la valeur du D_{max} , dimension des plus gros éléments dans le sol ;
- le tamisat à 0,08 mm (teneur en fines).

■ Teneurs en composants chimiques tels que :

- matières organiques ;
- phosphates et nitrates ;
- chlorures ;
- sulfates et sulfures, dont la présence dans les sols est la plus fréquente (gypses notamment).

Elles sont à prendre en compte car l'aptitude au traitement nécessite que certains seuils en teneur de ces constituants ne soient pas dépassés. Ils ont des effets néfastes complexes sur le déroulement de la prise hydraulique et peuvent initier des désordres, par exemple consécutifs à des phénomènes de gonflement, qui se produiraient pendant l'exploitation de l'ouvrage.

2.4.2 Paramètres d'état

■ État hydrique

Il est très important pour le déroulement de l'ensemble du processus de traitement. Il influe sur le choix des produits de traitement, leur dosage, leur prise et sur les conditions de mise en œuvre.

On le détermine par l'une ou l'autre des valeurs suivantes :

- le rapport W_N/W_{OPN} (normes NF P94-078, pour les états « très secs » à « moyens » ;
- l'indice portant immédiat IPI (norme NF P94-078), pour les états « humides » et « très humides » ;

— l'indice de consistance (I_c) :

$$I_c = \frac{W_L - W_N}{W_L - W_P}$$

avec W_N teneur en eau naturelle,
 W_{OPN} teneur en eau à l'optimum Proctor normal,
 W_L et W_P limites d'Alterberg, limites de liquidité qui séparent l'état liquide de l'état solide (L) et l'état plastique de l'état solide (P).

L'indice I_c est applicable à tous les états hydriques des sols très argileux.

2.4.3 Paramètres de comportement

■ **Fragmentabilité et dégradabilité** des éléments grossiers $D > 50$ mm (normes NF P 94-066 et 067) applicables aux matériaux rocheux évolutifs.

■ **Abrasivité de la fraction grenue** (éléments $> 0,08$ mm)

Cette caractéristique influe sur l'usure des outils de malaxage.

3. Produits de traitement

3.1 Chaux aérienne

3.1.1 Fabrication de la chaux

La chaux aérienne est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO_3Ca) à une température d'environ 900 °C suivant la réaction :



Cette réaction est réversible. La chaux produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante, se recarbonater lentement sous l'effet du dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'atmosphère.

Une prise s'effectue à l'air, d'où le terme de « **chaux aérienne** » se distinguant de la « **chaux hydraulique** ».

3.1.2 Caractéristiques des chaux aériennes

Les caractéristiques les plus importantes pour le processus du traitement des matériaux sont les suivantes :

- la forme sous laquelle la chaux aérienne est utilisée :
 - chaux vive (la plus utilisée),
 - chaux éteinte,
 - lait de chaux,
 - chaux vive dite « lourde », 4^e forme non citée dans le GTS, alourdie par addition d'huile de colza. Cette chaux est moins volatile et, par conséquent, son emploi permet de réduire les émissions de poussières. Son utilisation est préconisée dans certains marchés d'infrastructures incluant des dispositions particulières de protection de l'environnement ;
- la teneur en chaux libre, exprimée sous la forme de CaO ;
- la granularité, définie à l'aide des tamisats 2, 0,2 et 0,02 mm ;
- la réactivité, déterminée par l'essai réalisé selon la norme NF P98-102 (essai dit de « réactivité à l'eau ») (cf. [Doc. C 5 362]). Cet essai, applicable à la chaux vive, est représentatif des qualités de la chaux : cuisson, finesse de broyage et taux de chaux libre.

La forme la plus utilisée dans le traitement des matériaux est la chaux vive livrée en vrac (95 % des marchés environ). Le guide GTS se limite à cette seule forme dans ses applications.

Nous livrons ci-après quelques commentaires sur les autres formes et leurs possibilités d'utilisation.

■ Chaux éteinte

Son action est limitée à la neutralisation des argiles et à la correction de la granulométrie. Elle ne diminue pratiquement pas la teneur en eau. Elle est donc utilisée pour le traitement de matériaux à faible teneur en eau, des matériaux argileux secs par exemple, notamment dans les domaines agricoles. Son coût est élevé.

■ Lait de chaux

C'est une forme plus concentrée et plus liquide et sa prise est très lente. Elle est utilisée dans des cas spécifiques de traitement de matériaux secs, uniquement pour la réalisation de remblais. Cette forme assure une meilleure diffusion, notamment dans les roches argileuses.

Du fait d'un climat tempéré et humide, les laits de chaux sont peu utilisés en France. Ils le sont beaucoup plus dans les pays arides [notamment aux États-Unis (Texas par exemple)].

Exemple : nous pouvons citer l'expérience récente de ce type de traitement, réalisé dans le cadre de planches d'essais sur l'autoroute A89 à Mansac ; des pérites provenant des déblais ont été traitées au lait de chaux dans le but d'être réutilisées en remblai.

3.2 Liants hydrauliques

3.2.1 Ciments

Se référer à la rubrique « *Bétons hydrauliques* » de la base documentaire **Structure et gros œuvre** des Techniques de l'Ingénieur.

Les ciments sont des liants hydrauliques dont les caractéristiques sont conformes à des normes établies, pour la plupart de longue date, sur la base d'une grande expérience. Cela apporte une garantie notable sur leurs propriétés et leur homogénéité.

En matière de traitement de matériaux sont utilisés des ciments courants, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P 15-301 (révisée en 1994) (cf. [Doc. C 5 362]).

Les ciments les plus utilisés sont, dans l'ordre : des CPJ, des CLK, des CPA, plus rarement des CHF, dont l'emploi est à confirmer par une étude spécifique.

À noter qu'une nouvelle dénomination, dans le cadre du marquage Communauté européenne, est en vigueur (CEM I, II, III et IV).

3.2.2 Liants spéciaux routiers LSR (ou liants hydrauliques routiers LHR)

Depuis plusieurs années, des liants spéciaux routiers ont été mis au point et fabriqués pour des emplois spécifiques de traitement de sols, relatifs à la constitution de parties supérieures de terrassement (PST), de bases de remblais insensibles à l'eau et de couches de forme.

Dans l'attente d'une norme, ils faisaient l'objet, dans un premier temps, d'avis délivrés par le Comité français pour les techniques routières. Aujourd'hui, une norme définit la composition, les spécifications et les critères de conformité des liants hydrauliques routiers, la norme NF P 15-108 (cf. [Doc. C 5 362]), éditée en décembre 2000. Les intérêts de ce type de liants, par rapport aux ciments classiques, sont de plusieurs ordres. Nous les soulignerons au paragraphe 5.3.

La teneur en chaux de ces liants est variable suivant l'effet recherché ; elle peut être suffisante pour éviter un prétraitement à la chaux vive dans le cas des assises de remblais ou des PST – ce n'est pas le cas pour les couches de forme.

Une recherche permanente et des études ciblées sont menées par les industriels pour améliorer encore la spécificité de ces produits.

3.3 Eau

La teneur en eau présente dans les sols et sa nature sont des critères déterminants pour obtenir un traitement réussi.

La présence éventuelle de certains ions (comme H^+ , SO_3^{2-} ou NO_3^- par exemple, dans l'eau libre retenue dans le sol) ou l'apport d'eau éventuel peut altérer l'action des produits de traitement. La nature de l'eau fait l'objet de la norme NF P98-100 type 1 (ou éventuellement type 2 après étude spécifique).

Les marchés de travaux routiers préconisent de plus en plus une analyse de l'eau et une conformité à la catégorie 1 (pratiquement eau potable).

4. Traitement à la chaux vive

4.1 Actions de la chaux vive

■ Actions immédiates (produites au moment du malaxage) :

- diminution de la teneur en eau naturelle ;
- modification des caractéristiques de la fraction argileuse du sol.

■ Actions à long terme (poursuivies sur plusieurs mois) :

- action pouzzolanique ;
- action de syntaxie.

■ Neutralisation de l'acidité du milieu

Soulignons également que l'apport de chaux dans un sol augmente très rapidement et de manière conséquente le pH de ce dernier, jusqu'à une valeur ≥ 12 , facteur important de la prise hydraulique.

4.1.1 Diminution de la teneur en eau naturelle

Lors du mélange chaux-matériau, trois phénomènes interviennent :

- l'hydratation de la chaux vive, qui se traduit par la réaction :



- la chaleur dégagée par cette réaction (64,8 kJ/mole) provoque la vaporisation d'une certaine quantité d'eau ;
- la production de chaux éteinte augmente la masse de solide du mélange.

Ces trois phénomènes concourent à l'abaissement de la teneur en eau naturelle des matériaux.

Le traitement à la chaux est particulièrement indiqué pour les matériaux dont l'état hydrique est situé entre h et th (classification GTR, cf. [C 5 361]).

Dans la pratique, à titre indicatif, l'ordre de grandeur constaté pour l'action de la chaux vive varie de 1 % à 3 % de baisse de teneur en eau par pour-cent de dosage en chaux.

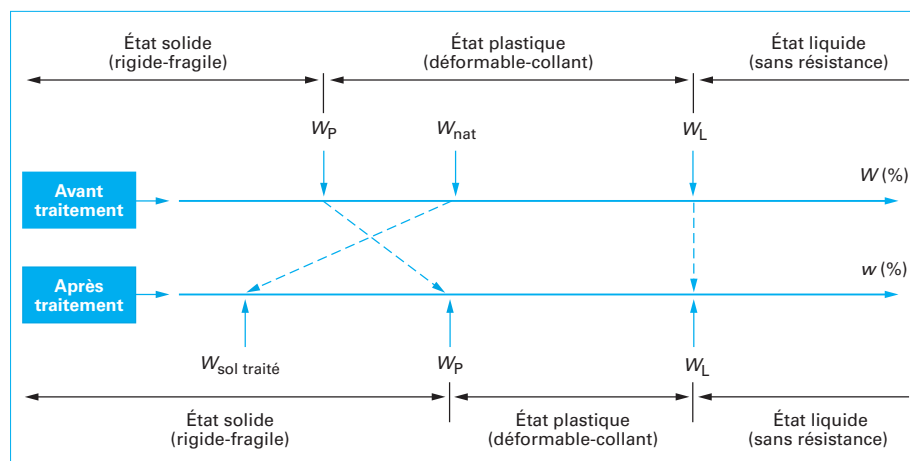


Figure 2 – Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive

4.1.2 Modification de la fraction argileuse du matériau

La chaux vive agit sur les charges électriques des particules fines et produit leur floculation. Cette action modifie certaines caractéristiques géotechniques du matériau, en premier lieu elle provoque la réduction de l'indice de plasticité (I_p). Dans le même temps, elle augmente la résistance au cisaillement et modifie les caractéristiques de compactage du matériau.

Les figures 2 et 3, extraites du GTS, donnent une représentation des actions immédiates de la chaux sur des sols argileux.

4.1.3 Action pouzzolanique

L'ajout de chaux dans des sols contenant des éléments argileux entraîne la précipitation et la cristallisation des ferrosilicates d'alumine.

Les facteurs intervenant dans le déroulement de la prise hydraulique des mélanges sont la température du milieu, la quantité et la nature de la fraction argileuse, et l'état hydrique du sol. L'action pouzzolanique améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques des matériaux traités, notamment leur insensibilité à l'eau caractérisée par la vérification de $I_{CBR}/IPI \geq 1$.

4.1.4 Action de syntaxie

Cette action se produit lorsque la chaux est incorporée dans des matériaux carbonatés (calcaires, craies) et se caractérise par le phénomène de prise aérienne qui améliore durablement les caractéristiques des matériaux ainsi traités et peut permettre leur utilisation en remblai ou en PST.

4.2 Utilisation des traitements à la chaux

L'amélioration des caractéristiques mécaniques autorise, voire recommande, la réutilisation des sols traités à la chaux :

- dans les bases de remblais de grande hauteur ($H > 10$ m) et dans celles des remblais situés en zones humides ou inondables ;
- pour le raidissement des pentes de talus, notamment quand les emprises sont limitées ou lorsque les accès sont difficiles ;
- pour l'amélioration et le surclassement des PST ;
- pour les corps de remblais, lorsque les matériaux sont :
 - à caractère évolutif comme, par exemple, ceux de classe R_{31} à R_{34} suivant le GTR, notamment pour ce qui concerne les déformations et évolutions à long terme,

- érodables comme les sols à dominante sableuse au niveau des talus des déblais et remblais ;
- éventuellement, pour des couches de forme.

D'autre part, l'action de la chaux, qui entraîne la floculation des argiles, peut permettre la réalisation de traitements mixtes [chaux-ciment, chaux-liants spéciaux routiers (LSR) ou liants hydrauliques routiers (LHR)], traitements mixtes qui facilitent, par ailleurs, le passage en centrale de traitement des sols préchauffés.

5. Traitement aux liants hydrauliques

5.1 Action des liants hydrauliques

Les ciments et les liants hydrauliques routiers (LHR) confèrent aux matériaux traités, en présence d'eau, une cohésion permanente dénommée « **prise hydraulique** », dont l'importance et la qualité dépendent :

- de la nature du matériau traité ;
- du type de liant utilisé ;
- de la quantité de liant introduite dans le mélange ;
- de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du liant ;
- de la qualité de la mouture du matériau après traitement ;
- de la compacité atteinte lors de la mise en œuvre ;
- de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Le rôle des liants hydrauliques est d'améliorer les caractéristiques mécaniques des mélanges de sols traités (liants seuls ou associés à la chaux) de manière pérenne.

Nous rappelons que les caractéristiques des ciments sont définies dans la norme NF P15-301 et celles des liants LHR dans la norme NF P15-108 (cf. [Doc. C 5 362]).

5.2 Traitements au ciment

En matière de traitement de matériaux, les ciments courants ont été utilisés majoritairement jusqu'aux années 1980. Par la suite, ils ont été progressivement remplacés par les liants spéciaux routiers, plus appropriés aux conditions et aux exigences de mise en œuvre des matériaux, sur les chantiers de terrassement et de couche de forme. Depuis 2000 environ, ils ne sont pratiquement plus utilisés dans les traitements.

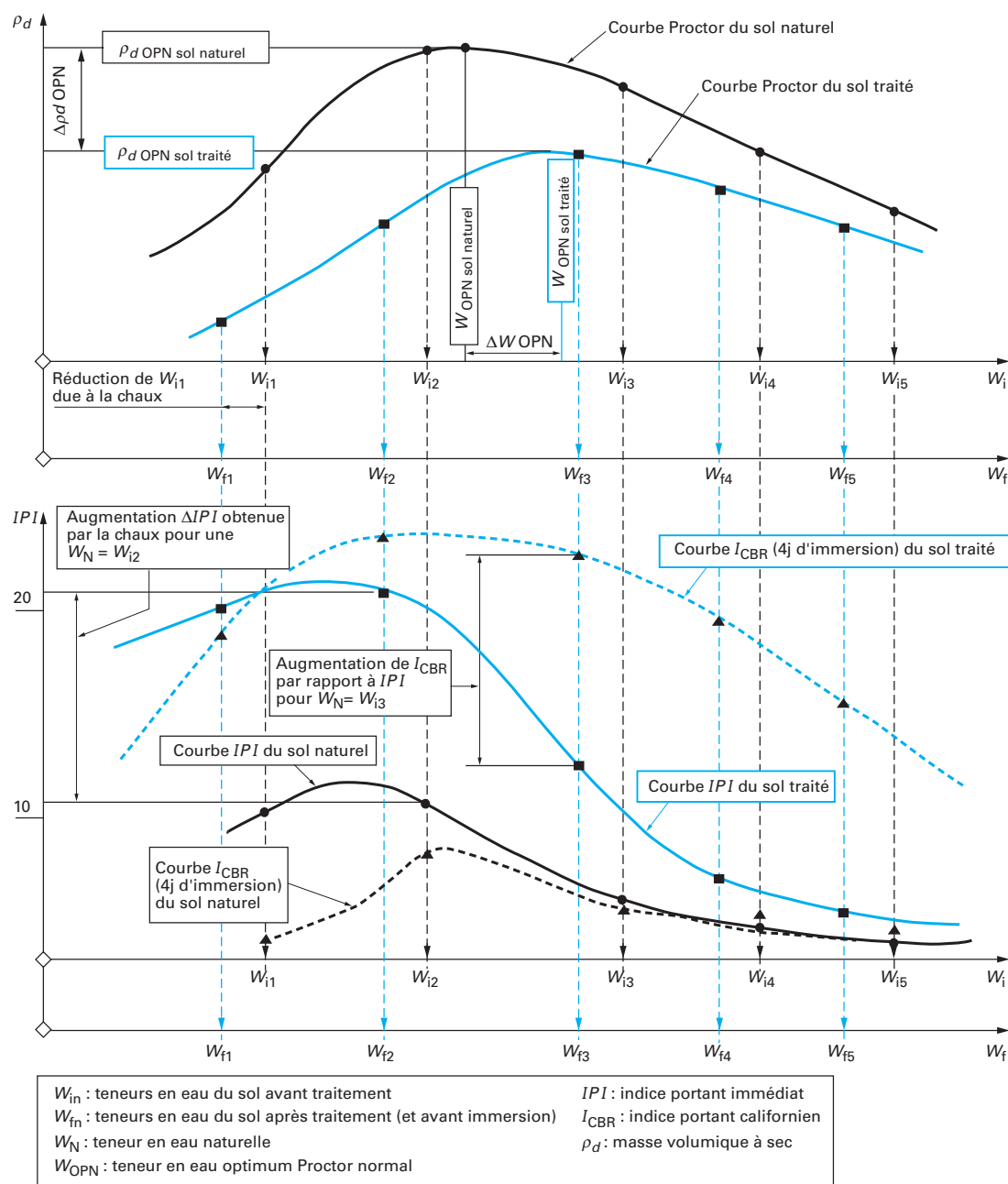


Figure 3 – Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A₂ traité à 2 % de chaux vive

5.3 Traitements aux liants hydrauliques routiers (LHR)

La fabrication de LHR s'est fortement développée à partir des années 1980 et, depuis les années 1990, leur utilisation est devenue beaucoup plus courante que celle des ciments en raison des intérêts notables suivants :

- l'amélioration constante de leurs caractéristiques qui se traduit de plus en plus par la normalisation de bon nombre de ces produits ;
- l'obtention à moyen et à long terme de caractéristiques mécaniques comparables à celles obtenues avec des ciments classiques ;
- une meilleure adaptation aux cas spécifiques des matériaux à traiter, à la particularité des chantiers. À titre d'exemple, il existe des liants spéciaux pour les craies ;

- leur délai de maniabilité plus long, grâce à une prise plus lente, et donc d'une utilisation plus souple que celle des ciments, lors des opérations de traitement ;
- la plus faible fissuration des matériaux traités et des ouvrages sus-jacents (chaussées, plates-formes industrielles...), en raison de leur module d'élasticité généralement plus faible que celui obtenu par le traitement des sols avec les ciments traditionnels ;
- un coût souvent plus économique.

5.4 Utilisation des traitements aux liants hydrauliques

L'obtention des caractéristiques mécaniques visées par l'action du traitement aux liants hydrauliques permet l'utilisation des matériaux traités dans le but d'améliorer :

- la PST : avec, entre autres, la possibilité de surclassement des classes d'arase ;
- la couche de forme en tenant compte des mêmes critères que ceux énoncés ci-avant pour la PST ;
- la couche de fondation ;
- les blocs techniques et massifs de soutènement (masques poids par exemple) ;
- les bases de remblai rendues insensibles à l'eau.

Nota : « masques poids », remblais de soutènement par substitution ou ajout de matériaux rapportés (naturels ou traités) en général mis en œuvre dans une zone de déblai affectée ou susceptible d'être affectée par un glissement de terrain.

6. Traitements mixtes chaux – liants hydrauliques

Ce type de traitement intéresse essentiellement la réalisation de couches de forme, parfois la réalisation de PST.

L'opération de traitement mixte comporte un prétraitement à la chaux des matériaux, réalisé avant le traitement aux liants hydrauliques. Elle s'applique à des matériaux argileux, pour lesquels il est nécessaire, en premier lieu, de flocculer la fraction argileuse par l'action de la chaux vive, pour favoriser ensuite la prise avec le liant hydraulique – plus rarement pour baisser préalablement la teneur en eau du matériau.

Lorsque la technique employée est celle d'un traitement aux liants hydrauliques en centrale de malaxage, le prétraitement à la chaux est également appliqué pour faciliter l'écoulement des matériaux dans la trémie d'alimentation.

7. Matériels de traitement

Notre propos dans cet exposé se limitera à citer les différents types de matériels utilisés dans la cinématique du traitement. Des éléments plus détaillés seront fournis dans le dossier « *Réalisation des ouvrages en terre* ».

Le GTS présente une bonne illustration de ces matériels qui sont en perpétuels renouvellement et évolution. Cette évolution répond à de nouveaux critères de précision (dosage en liants, épaisseur des couches...), de fiabilité et à des exigences accrues en matière de sécurité et d'environnement (réductions des poussières notamment).

Les matériels les plus représentatifs sont énumérés ci-après et traitent respectivement du stockage, de l'épandage, du malaxage, de l'arrosage et du compactage.

7.1 Matériels de stockage

Les produits de traitement se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac sur chantier par transport routier, à l'aide de **silos tractés**. Ils sont stockés :

- dans des **silos mobiles**, adaptés aux chantiers de traitement en place ;
- dans des **silos fixes**, s'il s'agit de traitement en centrale.

Les silos ont des contenances comprises entre 20 et 100 t.

7.2 Épandeurs

Les épandeurs de première génération, jusque vers les années 1980, étaient des engins à doseurs volumétriques. Ceux de deuxième génération étaient également des épandeurs à doseurs volumétriques, mais asservis à la vitesse de déplacement.

Les épandeurs de dernière génération comportent les outils décrits ci-avant et disposent en outre, de l'ajustement des quantités de liant à l'aide de dispositifs pondéraux (figure 4 a).

7.3 Malaxeurs

Les malaxeurs sont de différentes natures. On distingue :

- les rotobèches ;
- les malaxeurs à outils fixes ou animés ;
- les centrales de malaxage.

■ Rotobèches

Ce sont des engins issus du domaine agricole, adaptés en fonction des besoins au domaine du « Génie civil ».

■ Malaxeurs à outils fixes

Les malaxeurs de ce type sont réservés au traitement des sols avec de la chaux vive pour leur utilisation dans les corps des remblais, hors zones spécifiques (PST, base et carapace de remblai, etc.). Il s'agit :

- des charrues à disques ;
- des charrues à socs ;
- des engins à lames (bouteurs, niveleuses).

■ Malaxeurs à outils animés

Les malaxeurs de première génération, à axe horizontal, ont leur chambre de malaxage à l'arrière de l'appareil. Ceux des générations suivantes ont leur chambre de malaxage située entre les trains avant et arrière.

Les améliorations concernant les dernières générations d'appareils ont essentiellement porté sur :

- la profondeur de malaxage (aujourd'hui de l'ordre de cinquante centimètres) ;
- la puissance des engins (jusqu'à six cents chevaux) ;
- l'amélioration des outils d'attaque au sol.

Certains malaxeurs sont équipés d'un système d'injection d'eau disposé à l'intérieur de la chambre de malaxage, ainsi que d'un système de guidage GPS (figure 4 b).

■ Centrales de malaxage

L'emploi des centrales de malaxage est recommandé pour le malaxage des matériaux des couches de fondation et des couches de forme de type PF4 (selon la définition du GTR) et, le cas échéant, elles peuvent être appropriées pour le malaxage des matériaux de couche de forme de type PF3.



(a) épandeur/tombereau articulé



(b) pulvi-mixeur



(c) arroseuse enfouisseuse, avec citerne attelée sur tracteur, équipée d'un débitmètre en service

Figure 4 – Matériels de traitement

7.4 Arroseuses

La gamme de matériel généralement utilisée est sommairement décrite ci-dessous :

- citerne d'eau équipée d'une queue de carpe ;
- citerne d'eau équipée d'une rampe d'arrosage avec ou sans débitmètre, avec ou sans système d'asservissement ;
- arroseuse enfouisseuse généralement équipée d'un débitmètre, avec ou sans système d'asservissement (figure 4 c).

7.5 Compacteurs

Les modalités de compactage, qui dépendent d'une multitude de paramètres, sont bien définies et développées dans le GTR qu'il convient de consulter et d'adapter à chaque configuration de chantier.

Le choix de l'ensemble de l'atelier de traitement sera défini en fonction de l'ouvrage à réaliser, de la nature des matériaux, des produits de traitement et des conditions du site.

8. Protection de l'environnement et sécurité

Les poussières de chaux et de liants hydrauliques émises durant les travaux de traitements causent des nuisances, qu'il est indispensable de limiter en prenant des dispositions de chantier, que le GTS cite.

Les marchés de travaux comportent des clauses spécifiques concernant ces dispositions d'exécution.

Des exemples de travaux de traitement dans des zones très sensibles se sont multipliés à l'occasion de la construction de nouvelles lignes TGV, contiguës à des sections d'autoroutes en service (ou l'inverse parfois). Ces chantiers font l'objet de méthodes particulières de traitement adaptées à leur configuration contraignante.

Une meilleure protection de l'environnement est également prise en compte par l'évolution des matériels, ainsi que par la possibilité d'utiliser, dans les cas les plus critiques, des produits de traitement spéciaux comme les chaux « lourdes » que nous avons citées précédemment.

La sécurité du personnel doit être assurée vis-à-vis des risques particuliers que constituent les émissions de poussières. Les mesures de prévention comportent notamment un équipement vestimentaire de protection.

9. Études de traitement

La décision de recourir au traitement pour réaliser un remblai ou une couche de forme doit être prise sur la base d'éléments objectifs issus :

- d'**études géotechniques** qui comportent deux volets principaux, l'identification des matériaux et la formulation des mélanges ;
- d'**études économiques**, notamment la comparaison de l'option traitement de matériaux du site avec d'autres solutions, emprunts ou fournitures extérieures.

Les études de traitement doivent donc être organisées selon un programme préétabli qui se référera à trois niveaux d'étude qui, dans le cadre général d'un projet, s'inscrivent aux stades des « **études préliminaires** », de « **l'avant-projet** » et du « **projet d'exécution** ».

Le tableau **1** tiré du GTS (référence A-II) illustre bien ce propos.

9.1 Études de traitement des matériaux mis en remblai

Le traitement des matériaux vise principalement la réutilisation de matériaux trop humides à l'état naturel.

Il est également préconisé pour d'autres applications visant à améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux en vue de leur emploi dans la construction de certaines parties d'ouvrages spécifiques, que nous avons mentionnées au paragraphe 4.2, notamment :

- les parties supérieures des terrassements (PST) ;
- les remblais des zones d'accès difficiles (remblais contigus aux ouvrages d'art, aux ouvrages d'assainissement...) ;
- les parties basses de remblais de grande hauteur, en zone humide, en zone inondable ;
- les remblais en matériaux rocheux évolutifs ;
- le raidissement de talus.

Les études de traitement doivent être menées suivant un processus s'inspirant du tableau **1** et du tableau **2** (référence B-II du GTS).

Tableau 1 – Différents niveaux à considérer dans l'établissement d'un programme d'étude de traitement			
Niveau d'étude	Objectifs habituellement dévolus à l'étude	Indications générales sur le contenu de l'étude	Stade du projet habituellement concerné
0	Fournir les éléments techniques, économiques, environnementaux, etc. permettant de répondre sur la faisabilité du projet	Collecte de la documentation (carte géologique, dossiers géotechniques de chantiers comparables, etc.) Analyse de cette documentation à la lumière des considérations générales relatives au traitement et des particularités techniques, économiques et environnementales, etc. du projet Consultation éventuelle d'experts	Étude préliminaire
1	Confirmer la faisabilité du traitement Fournir les éléments aboutissant au prédimensionnement technique et économique du projet	Interprétation des données de la reconnaissance géotechnique générale en fonction de l'application du traitement de sol envisagée et, si nécessaire, réalisation de quelques reconnaissances et essais d'identification complémentaires Exécution d'études de formulation sommaires pour préciser la nature du (ou des) produit(s) de traitement et l'ordre de grandeur des dosages Dans le cas de traitement pour couche de forme en particulier, essais de vérification de l'aptitude du sol à être traité Étude économique de la solution traitement et des solutions alternatives	Avant-projet
2	Préciser les éléments de prédimensionnement acquis à l'issue de l'étude de niveau 1 en vue de l'établissement de la solution de base présentée à l'appel d'offres	Étude géotechnique détaillée aboutissant à la qualification des sols dont le traitement est envisagé et à leur localisation dans le profil géotechnique Dans le cas de traitement appliqué à la réalisation de remblais, exécution de quelques études de formulation complémentaires (fonction de la complexité et de l'importance du projet) Dans le cas de traitement pour couche de forme, exécution d'une étude de formulation de niveau 1 (tel que défini au § C-I-2.3.2. du GTS)	Projet d'exécution
3	Fournir les éléments techniques, économiques et environnementaux, etc. déterminants pour valider les options du projet et ne pouvant être considérés comme acquis au terme des études de niveau 0, 1 et 2	Étude spécifique de traitement pour : — confirmer, sur un chantier expérimental, la faisabilité pratique du malaxage, du compactage ou la limitation des émissions de poussières ; — suivre, durant un cycle annuel, les états hydriques des sols d'un déblai ou d'un emprunt ; — vérifier <i>in situ</i> le niveau des performances obtenues par une technique de mise en œuvre donnée ; — etc.	Ce niveau d'étude peut être engagé à l'un ou l'autre des stades d'avancement de l'étude ci-dessus en fonction des enjeux des réponses attendues

Tableau 2 – Niveaux d'étude de traitement d'un sol pour réutilisation en remblai

Niveau d'étude	Contenu de l'étude	Réponses attendues	Stade du projet habituellement concerné
0	Collecte des données documentaires disponibles (cartes géologiques, fichiers d'éléments géotechniques et météorologiques, dossiers d'étude de chantiers comparables, etc.) Recueil de l'expertise locale Analyse et synthèse de ces éléments dans la perspective du traitement de sol appliqué au projet envisagé	Appréciation de la nécessité du traitement et de son importance relative pour l'opération envisagée Mise en évidence de difficultés anormales éventuelles pouvant mettre en cause la faisabilité du traitement sur le chantier considéré	Étude préliminaire
1	Interprétation, dans la perspective du traitement, des éléments acquis dans le cadre de la reconnaissance géologique et géotechnique générale du tracé Si nécessaire, exécution de quelques sondages complémentaires (tarière, pelle, etc.) pour identification plus fine des principales formations concernées Exécution d'une étude de formulation sommaire sur la (éventuellement les deux ou trois) famille(s) de sols la (les) plus représentative(s) Établissement d'une synthèse de l'ensemble de ces éléments	Évaluation des volumes probables de sols à traiter et des techniques et matériels d'exécution utilisables Détermination du (ou des) produit(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) et des quantités nécessaires probables avec une précision admissible pour un prédimensionnement (technique, économique, délais d'exécution)	Avant-projet
2	Compléments de reconnaissances géotechniques en vue de l'identification de l'ensemble des formations de sols concernées par le traitement Pour chaque formation distinguée, constitution d'échantillons représentatifs (du sol moyen et des sols extrêmes) Exécution des mesures permettant d'évaluer la plage des états hydriques probables de chaque formation au moment de la réalisation du chantier Identification, si nécessaire, du produit de traitement utilisé dans l'étude Exécution d'une étude de formulation sur les échantillons représentatifs de chaque formation, afin de préciser les dosages à appliquer en fonction des teneurs en eau (une partie plus ou moins importante de ces études de formulation peut toutefois être reportée au niveau des études d'exécution réalisées en cours de travaux)	Qualification de l'ensemble des sols devant être traités Établissement des règles régissant les dosages à appliquer en fonction de la nature et de l'état des sols Localisation, sur le profil en long géotechnique, de chaque formation relevant des mêmes modalités d'exécution (techniques, matériels, produits de traitement) et pouvant être considérée comme opérationnellement identifiable au moment de l'exécution	Projet
3	Évaluation de la plage des variations saisonnières de l'état hydrique de certains terrains à partir de méthodes appropriées (sondes neutroniques, capacitatives, prélèvements périodiques, etc.) Organisation et conduite d'un chantier expérimental de traitement, par exemple, dans le cas de : — l'utilisation de produit(s) de traitement innovant(s) pour lesquels on ne dispose pas d'expérience (identification du (ou de ces) produit(s), vérification en vraie grandeur de leur efficacité pour le chantier concerné, etc.) ; — l'expérimentation de techniques d'exécution non confirmées ou de matériels mal connus ; — traitement de sols particuliers (sols très argileux A ₄ , matériaux rocheux évolutifs, etc.) ; — etc.	Ce niveau d'étude est spécifique aux projets dont les enjeux du traitement sont déterminants d'une part et, d'autre part, pour lesquels les études de niveau inférieur ne sont pas en mesure de répondre correctement aux interrogations relatives à la faisabilité du traitement ou à son optimisation	Ce niveau d'étude peut être engagé à l'un ou l'autre des stades d'avancement de l'étude ci-dessus en fonction des enjeux des réponses attendues (1)

(1) En particulier, lorsque l'importance des enjeux du traitement dans l'élaboration du projet le justifie, ce niveau d'étude peut être engagé dès le stade des études préliminaires.

Tableau 3 – Objectifs du traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides en remblai

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)							
	A ₁ , C ₁ A ₁ , C ₂ A ₁ (1)	A ₂ , B ₆ , C ₁ A ₂ , C ₂ A ₂ (1), C ₁ B ₆ , C ₂ B ₆ , R ₃₄	A ₃ , C ₁ A ₃ , C ₂ A ₃ (1)	B ₄ , C ₁ B ₄ , C ₂ B ₄ (1)	B ₂ , B ₅ , C ₁ B ₂ , C ₂ B ₂ (1), C ₁ B ₅ , C ₂ B ₅ (1)	R ₁₂ (2)	R ₁₃ (2)	F ₂
Valeurs au-dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf. GTR)	8	5	3	15	12	15	10	15
Valeurs à obtenir sur le matériau traité(3)	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20	15 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25	25 à 30

(1) Les matériaux de ces classes comportent une fraction importante d'éléments anguleux supérieurs à 20 mm. De ce fait, l'estimation de leur portance à partir de la valeur de l'IPI mesuré sur leur fraction 0/20 mm peut ne pas être suffisamment représentative. Une évaluation plus précise nécessiterait de pratiquer des essais en place (essais à la plaque ou à la dynaplaque, etc.).

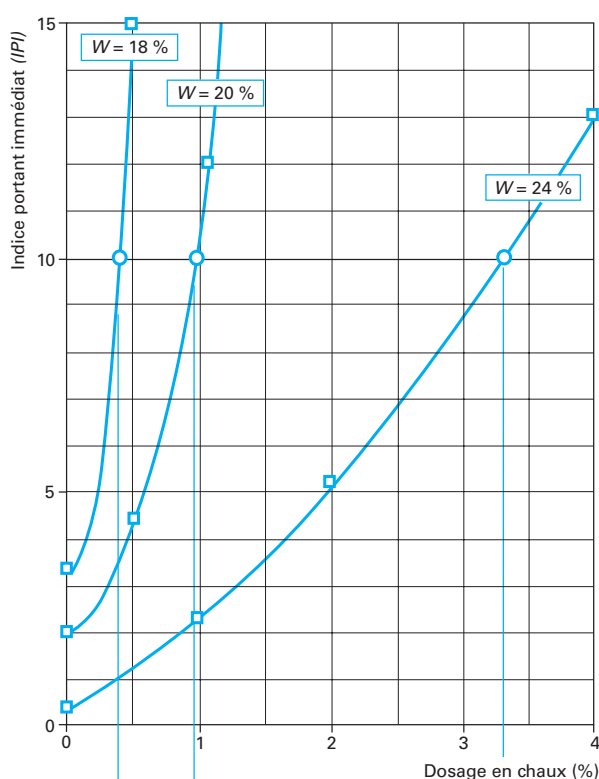
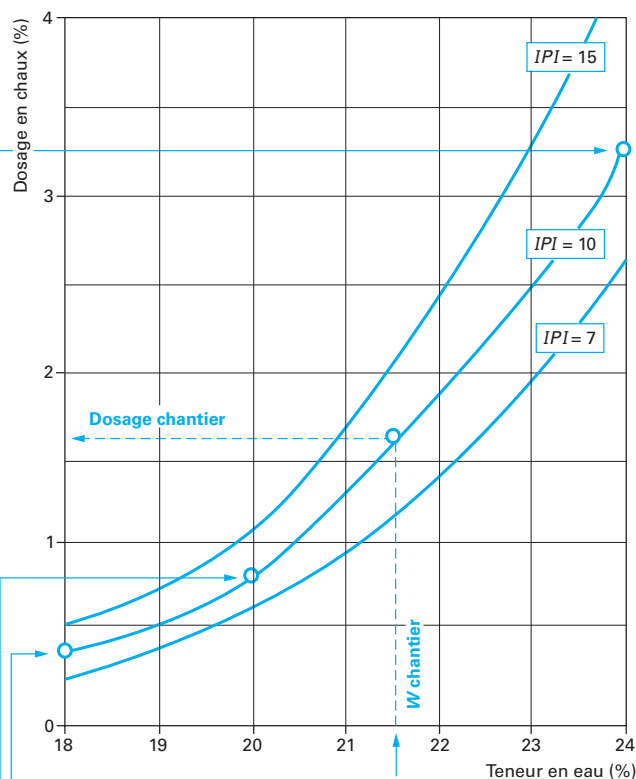
(2) Pour les classes R, les valeurs proposées ne sont pas issues du GTR, mais seulement indicatives. Pour les classes de matériaux sensibles à l'eau non envisagées dans le tableau, les valeurs de l'IPI à considérer doivent résulter d'une étude spécifique.

(3) Pour le traitement des PST, des valeurs majorées de 10 à 20 % doivent être considérées, étant entendu qu'il est en plus nécessaire de vérifier la condition $I_{CBR} / IPI \geq 1$ (cf. § B-2.2. du GTS).

Tableau 4 – Exemple de présentation des résultats d’une étude de formulation du traitement d’un sol (limon de classe A₂) pour réutilisation en remblai
Tableau des paramètres mesurés au cours d’une étude de formulation du traitement d’un sol pour « réutilisation en remblai »

Paramètres (1)		Dosages en chaux (%)				
		0	0,5	1	2	4
W_N du sol – 18 %	IP_I	3	15	23,5	35,5	27
	$W_{\text{sol traité}}$	18,1	17,6	17,1	16,4	14,7
	ρ_d	1,73	1,73	1,70	1,67	1,57
W_N du sol – 20 %	IP_I	2	5,5	14	23,5	23,5
	$W_{\text{sol traité}}$	19,7	19,6	19,3	18,7	17,4
	ρ_d	1,67	1,69	1,69	1,68	1,61
W_N du sol – 24 %	IP_I	0,5	1,5	2,5	5	13
	$W_{\text{sol traité}}$	24,1	23,7	23,1	21,7	20,5
	ρ_d	1,56	1,57	1,59	1,63	1,63

 (1) ρ_d : masse volumique à sec

 Évolution de l'indice portant immédiat (IP_I) en fonction du dosage en chaux pour différentes teneurs en eau (W) du sol

 Dosages en chaux nécessaires pour obtenir un indice portant immédiat (IP_I) de 5, 10 ou 15 en fonction des teneurs en eau (W) du sol (sans tenir compte de l'évaporation produite au malaxage)


9.1.1 Réutilisation de matériaux trop humides

Les objectifs et performances à rechercher, en fonction des matériaux trop humides traités, sont rappelés dans le tableau 3, page 12 (référence B-I du GTS).

Exemple : le GTS présente les résultats d’une étude du traitement d’un limon de classe GTR A2, sous la forme du tableau 4.

Si le contexte géologique laisse apparaître une probabilité significative de présence dans le matériau d’éléments perturbateurs (matières organiques, sulfates, etc.), une vérification de l’aptitude du matériau à être traité sera engagée selon la norme NF P94-100 afin de détecter d’éventuels gonflements.

La limite de gonflement devra être inférieure à 5 %. Au-delà de cette valeur, elle confère un caractère douteux à l’aptitude au traite-

ment du matériau étudié. Cependant, dans le cas de gonflements compris entre 5 et 10 %, un traitement peut encore être envisagé, sous réserve de résultats concluants obtenus à partir d'études complémentaires.

9.1.2 Traitement de parties d'ouvrages particulières

Les parties d'ouvrages particulières (PST, bases des remblais de grande hauteur, etc.) doivent répondre à des spécifications, généralement définies par les pièces écrites des marchés. Elles sont partiellement traitées dans le guide GTS, qui présente des objectifs de performances par application de traitements à certains matériaux particuliers de remblais ; ces performances peuvent être obtenues grâce à un traitement à la chaux seule, au liant seul, ou avec un traitement mixte chaux-liant. Ces objectifs figurent dans le tableau 5 (référence B VIII du guide).

9.2 Études de traitement des matériaux mis en couche de forme

9.2.1 Identification et caractérisation du gisement

Le gisement des matériaux aptes à constituer des couches de forme après traitement est déterminé sur la base d'une étude éco-

nomique. Il pourra s'agir de déblais du projet, d'emprunts du site ou de carrières extérieures, éventuellement d'un dépôt de matériaux préalablement constitué.

L'identification et la caractérisation d'un gisement sont nécessaires pour la mise en évidence de la qualité et de la quantité utile de matériaux pour le bon déroulement du chantier. La qualité du gisement est essentiellement dépendante de la classification GTR des matériaux, notamment de l'homogénéité de leur nature et de leur état, afin de faciliter les méthodes d'extraction.

9.2.2 Évaluation de l'aptitude du matériau au traitement

Préalablement à la réalisation des études de traitement, le géotechnicien lance l'essai d'aptitude au traitement d'un matériau, en définissant, à partir de ses connaissances et expériences, les dosages des liants hydrauliques associés ou non à ceux de la chaux vive.

Les critères retenus pour l'interprétation des résultats de l'essai d'aptitude sont donnés à titre indicatif dans le tableau 6 (référence C1-IV du GTS).

À noter que l'essai de compression diamétrale R_{tb} (plus communément appelé « essai à la traction de type brésilien ») correspond à la norme NF P98-232-3.

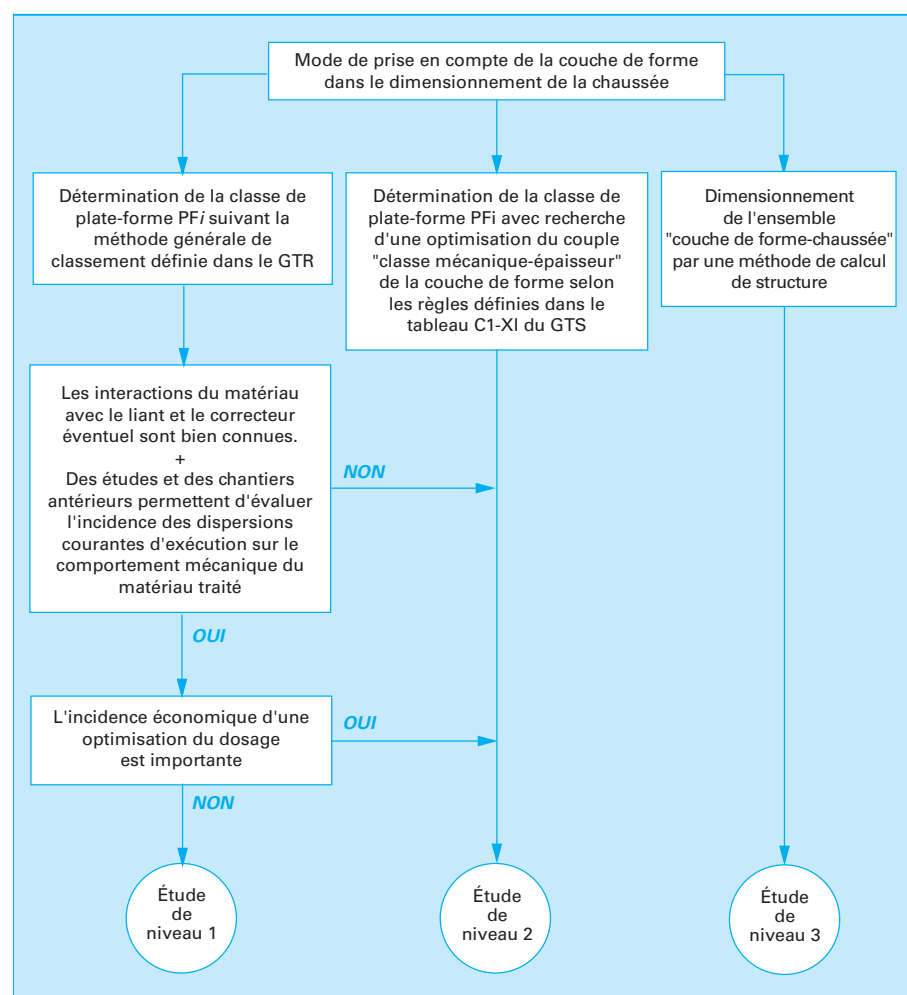
Tableau 5 – Performances à rechercher pour les applications du traitement des sols en remblai autres que la réutilisation de sols trop humides

Application	Critère d'évaluation significatif (1)	Valeurs seuils à viser	Observations
Amélioration de la PST	$IPI + I_{CBR}$ après 4 j d'immersion	Elles dépendent de la nature du sol À défaut d'expérience particulière, on pourra viser les valeurs de l' IPI à obtenir sur le matériau traité indiquées dans le tableau 3 majorées d'environ 20 % Les valeurs de l' I_{CBR} après 4 j d'immersion devront être au moins égales à celles de l' IPI pour la teneur en eau considérée	La conservation des valeurs de l' IPI (ou mieux leur augmentation) après 4 j d'immersion constitue une garantie de la pérennité des effets du traitement
Remblaiement de zones d'accès difficile	R_c à 28 j	Mesures à réaliser sur éprouvettes d'élancement 2 compactées à $\rho_d = 95 \% \rho_{d_{OPN}}$ Valeurs à obtenir après 14 j de cure + 14 j d'immersion $\geq 0,5$ à 1 MPa (suivant l'exiguité du volume à remblayer)	Vérifier que, pour le dosage permettant d'atteindre les valeurs de R_c visées, l' IPI correspondant satisfait également les valeurs indiquées dans le tableau 3 (tableau B-I du GTS)
Partie basse des hauts remblais en matériaux sensibles à l'eau ou/et évolutifs	R_c à 28 j	Idem ci-dessus (mais les valeurs à exiger sont à définir en fonction de la hauteur du remblai)	Idem ci-dessus + vérification dans le cas des matériaux évolutifs que la résistance du matériau avant traitement (mesurée sur bloc) est supérieure ou égale à la valeur visée
Raidissement des pentes de talus	R_c à 2 j + R_c à 28 j	Valeurs à déterminer par une étude spécifique de mécanique des sols prenant en compte les caractéristiques géométriques de l'ouvrage (hauteur et pente de talus) et le mode de réalisation	La R_c à 2 j à imposer doit permettre la mise en œuvre de l'ouvrage lorsque aucune disposition particulière (coffrage provisoire, etc.) n'est prévue Cette valeur n'a pas à être exigée s'il est prévu de retailler le talus à sa pente définitive après un temps de prise suffisant
(1) R_c résistance à la compression ρ_d masse volumique à sec			

Tableau 6 – Critères retenus pour l'interprétation de l'essai d'aptitude d'un sol au traitement

Type de traitement	Aptitude du sol	Paramètre considéré	
		Gonflement volumique G_v (%)	Résistance en compression diamétrale R_{tb} (MPa)
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	$0,1 \leq R_{tb} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique (1)
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	
	Inadapté	≥ 10	

(1) L'essai appliqué aux sols relevant de ce type de traitement ne renseigne que sur la potentialité de gonflements ettringitiques. Le développement correct de la prise pouzzolanique peut cependant être apprécié dans un délai comparable par l'étude Proctor- $IPI-I_{CBR}$ (cf. § 3.6.1 du GTS)

**Figure 5 – Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager**

9.2.3 Étude de formulation

Trois niveaux d'étude de formulation peuvent être envisagés :

- le niveau 1 qui permet de vérifier l'adéquation des performances obtenues avec les objectifs fixés ;

- le niveau 2 qui comporte la détermination des dosages en liants et l'optimisation des performances à atteindre ;
- le niveau 3 qui concerne le dimensionnement des couches de formes en fonction du calcul des structures de chaussées.

Ils sont clairement synthétisés figure 5 (référence C1-2 du GTS).

Les caractéristiques mécaniques visées des matériaux traités sont énumérées ci-dessous.

■ Matériaux traités à la chaux

- Indice portant $I_{CBR} \geq 20$ et $I_{CBR}/IPI \geq 1$ avec I_{CBR} mesuré après quatre jours d'imbibition ;
- Résistance à la compression $R_c \geq 2,5$ MPa .

■ Matériaux traités aux LHR avec ou sans chaux

Les critères de jugement portent sur les quatre points suivants :

- l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée ;
- la résistance à l'immersion au jeune âge ;
- la résistance au gel ;
- les performances attendues à long terme.

Le tableau 7 (référence GTS C1-IX) précise les seuils de chacun des critères énoncés auparavant et la figure 6 (référence GTS C1-IV) définit les zones de classement en fonction de la résistance à la traction R_t ($R_t = 0,8 R_{tb}$) et du module E de déformation du matériau traité (normes NF P98-232-2 et 3).

Le tableau 8 (référence GTS C1-X) permet la détermination de la classe mécanique du matériau traité en fonction de ses caractéristiques et de son mode d'élaboration (traitement en place ou en centrale).

La connaissance de la classe mécanique du matériau traité et celle de la classe d'arase permet le dimensionnement de la couche de forme traitée, en fonction du niveau de plate-forme visé. Ces différents critères sont repris dans le tableau 9, page 18 (référence GTS C1-XI).

L'interprétation de ce tableau doit être associée à l'analyse des nombreux tableaux définissant les épaisseurs préconisées de matériaux traités ou non, tableaux figurant dans le fascicule II du GTR et tenant compte, entre autre, de la situation météorologique et de l'état hydrique des sols concernés.

9.2.4 Protection superficielle

Les couches de forme en sols traités doivent recevoir une protection superficielle qui peut remplir plusieurs rôles, en premier lieu maintenir l'état hydrique du matériau pendant la prise hydraulique. Par la suite, elle pourra faciliter l'accrochage de la couche de fondation et assurer des fonctions de trafic de chantier.

10. Techniques de réalisation des traitements. Contrôles

10.1 Techniques de réalisation des traitements

Un exposé détaillé sur les techniques de réalisation figurera dans le dossier « Réalisation des ouvrages en terre » consacré au matériel et à l'exécution des chantiers.

Le guide GTS décrit les principales techniques d'exécution des traitements des remblais et des couches de forme. Nous en avons extrait, à titre indicatif, les figures 7 et 8, pages 18 et 19 (références GTS C2-1a et C2-1b) qui représentent la cinématique des opérations dans le cas des couches de forme.

La figure 9, page 19, montre l'exemple d'une telle réalisation sur le terrain.

10.2 Contrôles

Les contrôles concernant les traitements de corps de remblais, de remblais particuliers, de PST et de couches de forme, sont spécifiés dans les pièces techniques des marchés. Ils doivent intervenir avant, pendant et après le traitement des matériaux.

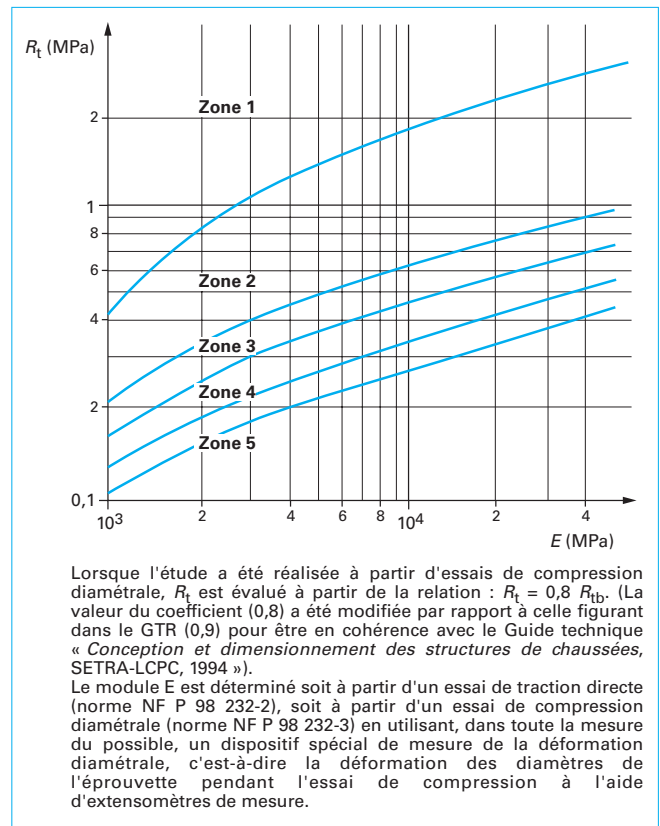


Figure 6 – Zones de classement du matériau en fonction de sa résistance à la traction R_t et de son module d'élasticité E

10.2.1 Contrôles avant le traitement

Les contrôles répondent, en premier lieu, à la nécessité impérative de connaître la nature et l'état hydrique du matériau, afin de déterminer sa classification selon le guide GTR et le dosage en liant qui s'avérera nécessaire.

Un autre point important de ces contrôles porte sur la vérification de la conformité de la chaux, notamment de sa réactivité.

10.2.2 Contrôles pendant le traitement

Pendant le traitement, il est nécessaire d'effectuer des contrôles pour s'assurer de la maîtrise des paramètres suivants :

- le coefficient de variation C_v de l'épandage du liant, au moyen notamment de l'essai à la bêche, qui s'exprime par la relation :

$$C_v = \frac{s}{m} \times 100$$

avec s écart-type des mesures de masse/m²,
 m moyenne des mesures ;

- la quantité d'eau qu'il faut incorporer au matériau ;
- l'épaisseur de matériau à traiter ;
- l'homogénéité de la mouture (malaxage et mélange sol-eau-liant).

Tableau 7 – Exigences requises pour les caractéristiques mécaniques d'un sol traité avec un liant hydraulique dans le cas d'une étude de niveau 1 (cf. figure 5)

Aspect du comportement du sol traité considéré	Caractéristiques mécaniques représentatives (1)	Critères de jugement
Âge autorisant la circulation sur la couche traitée	R_c à 7 j et R_c à 28 j (une mesure de R_c à 2 ou 4 j peut être avantageusement envisagée dans le cas de liant à prise relativement rapide et/ou lorsqu'il est prévu que les travaux seront réalisés à la belle saison)	La couche de forme peut être circulée dès que $R_c \geq 1$ Mpa (2) L'âge au bout duquel cette condition est réalisée est déduit par interpolation entre les valeurs de R_c mesurées à 7 et 28 j (ou entre 2 ou 4 j et 7 j, le cas échéant)
Résistance à l'immersion au jeune âge	R_c après 28 j de cure normale suivis de 32 j d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C (R_{ci}) R_c après 60 j de cure normale (R_{c60})	La résistance d'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante : si $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,80$ (2) (lorsque la VBS du sol est $\leq 0,5$) ou $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,60$ (2) (lorsque la VBS du sol est $> 0,5$)
Résistance au gel	R_t ou R_{tb} mesurée à l'âge du sol traité correspondant à la date probable d'apparition du gel sur le chantier considéré (3)	La résistance au gel est jugée satisfaisante si la R_{tb} à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel est supérieure à 0,25 MPa (4)
Performances escomptables à long terme	R_t ou R_{tb} et module d'élasticité E mesurés à 28 et 90 j et, si nécessaire, à 180 j dans le cas des LSR à prise lente	Le couple (R_t , E) déterminé à 90 j (ou éventuellement à 180 j dans le cas de liant à prise lente) conduit au moins à un matériau de classe mécanique 5 déterminée par application de la figure C1-4 et du tableau C1-X du GTS) (5)

- (1) Toutes les valeurs des caractéristiques énoncées ci-dessus sont la moyenne d'au moins trois mesures (R_c : résistance à la compression ; R_t : résistance à la traction).
- (2) Cette valeur constitue un objectif à rechercher dans le cas de chantier moyen ; des valeurs légèrement supérieures ou inférieures pouvant cependant être mieux adaptées à certains contextes particuliers.
- (3) À déterminer à partir des données statistiques des services de la Météorologie nationale. En première approche, on pourra s'inspirer des éléments présentés dans la note d'information technique « *Engazonnement des emprises routières – Détermination des périodes d'interdiction d'engazonnement* » (octobre 1974).
- (4) Cette valeur est à retenir dans l'état des connaissances actuelles. Elle peut être considérée comme une valeur enveloppe garantissant un bon comportement au gel (vis-à-vis du gonflement et de la gélifraction) des matériaux traités (à l'exception des craies pour lesquelles elle doit encore être confirmée). Si l'on dispose toutefois des résultats d'une étude de gonflement au gel spécifique, s'appuyant notamment sur des essais de gonflement au gel réalisés selon la norme NF P 98-234-2, ceux-ci prévalent par rapport à la valeur de résistance indiquée. Enfin, il faut également tenir compte du fait que les risques de gonflement par cryosuccion sont d'autant plus grands que les conditions climatiques sont favorables et qu'une possibilité d'alimentation en eau du matériau de couche de forme existe (zone en déblai, mal drainée en particulier). Pour ces raisons, la valeur de 0,25 MPa peut éventuellement être renforcée (0,3 MPa par exemple), soit au contraire ne pas être prise en considération (probabilité suffisamment faible d'apparition de gel ou sol naturel non gélif).
- (5) Il s'agit de la classe mécanique considérée dans les tableaux de dimensionnement des couches de forme du GTR.

Tableau 8 – Détermination de la classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques et de son mode de fabrication

Traitement en centrale (1)	Traitement en place	Classe mécanique du matériau
Zone 1		1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zone 4	5

- (1) Ce mode d'élaboration ne peut être envisagé que si l'on est assuré que les matériaux peuvent s'écouler correctement dans les différents organes des centrales (sols des classes B, D, et certains sols de la classe A prétraités à la chaux).

Tableau 9 – Classe de plate-forme PF en fonction de la classe d’arase AR, des performances mécaniques du matériau traité et de l’épaisseur de la couche de forme					
Classe mécanique du matériau de couche de forme	Épaisseur de la couche de forme				
	Cas d’une arase de classe AR ₁			Cas d’une arase de classe AR ₂	
Classe 3	(1)	30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
Classe 4	30 cm	35 cm	45 cm (2)	30 cm	35 cm
Classe 5	35 cm	50 cm (2)	55 cm (2)	35 cm	45 cm (2)
Classe de plate-forme obtenue	PF ₂	PF ₃	PF ₄	PF ₃	PF ₄
(1) En raison de l’importance du contraste des modules, la réalisation d’une couche de forme en matériau traité de classe mécanique 3, sur une arase AR ₁ , n’est pas autorisée au-dessous d’une épaisseur de 30 cm.					
(2) L’obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en œuvre en deux couches.					

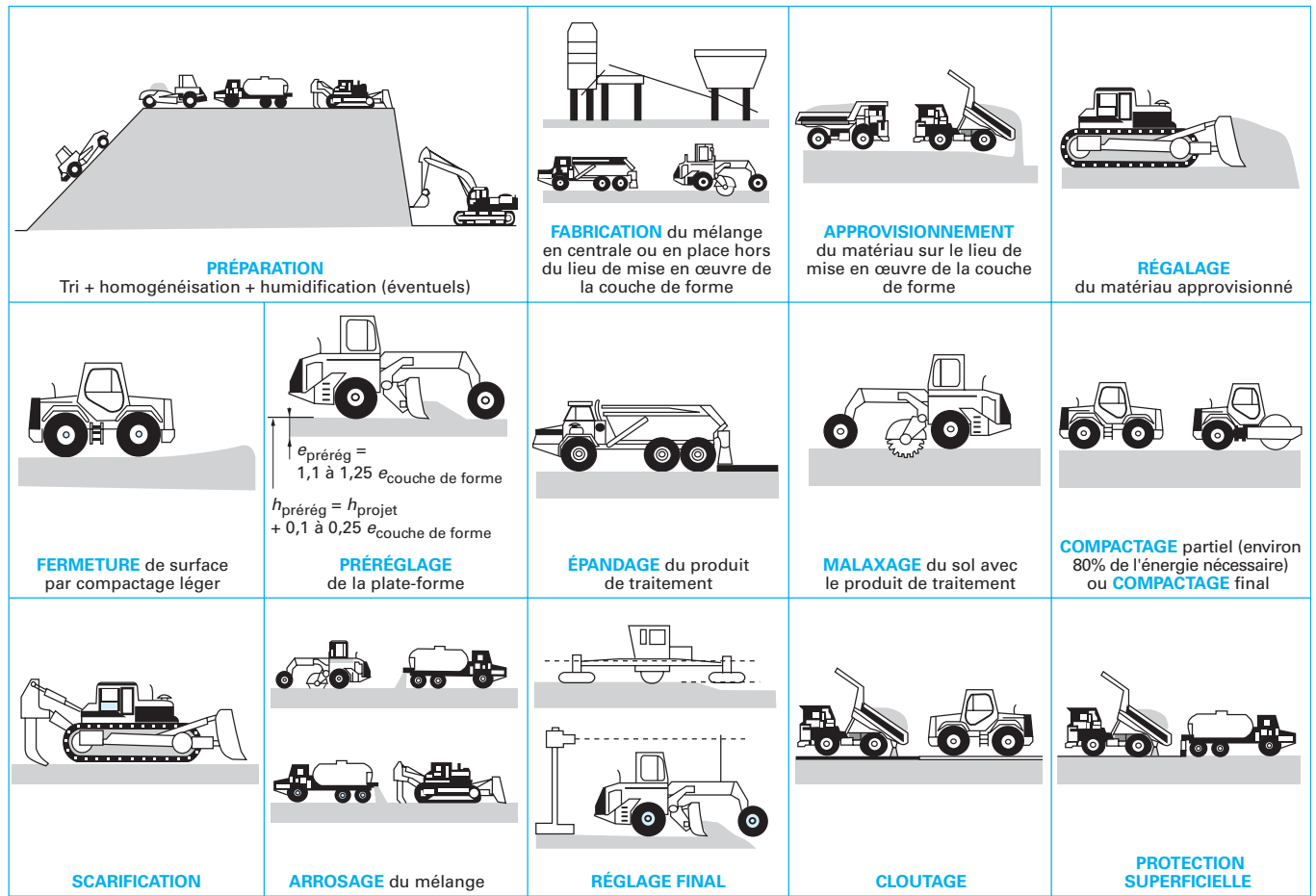


Figure 7 – Opérations élémentaires intervenant dans l’exécution d’une couche de forme en sol traité

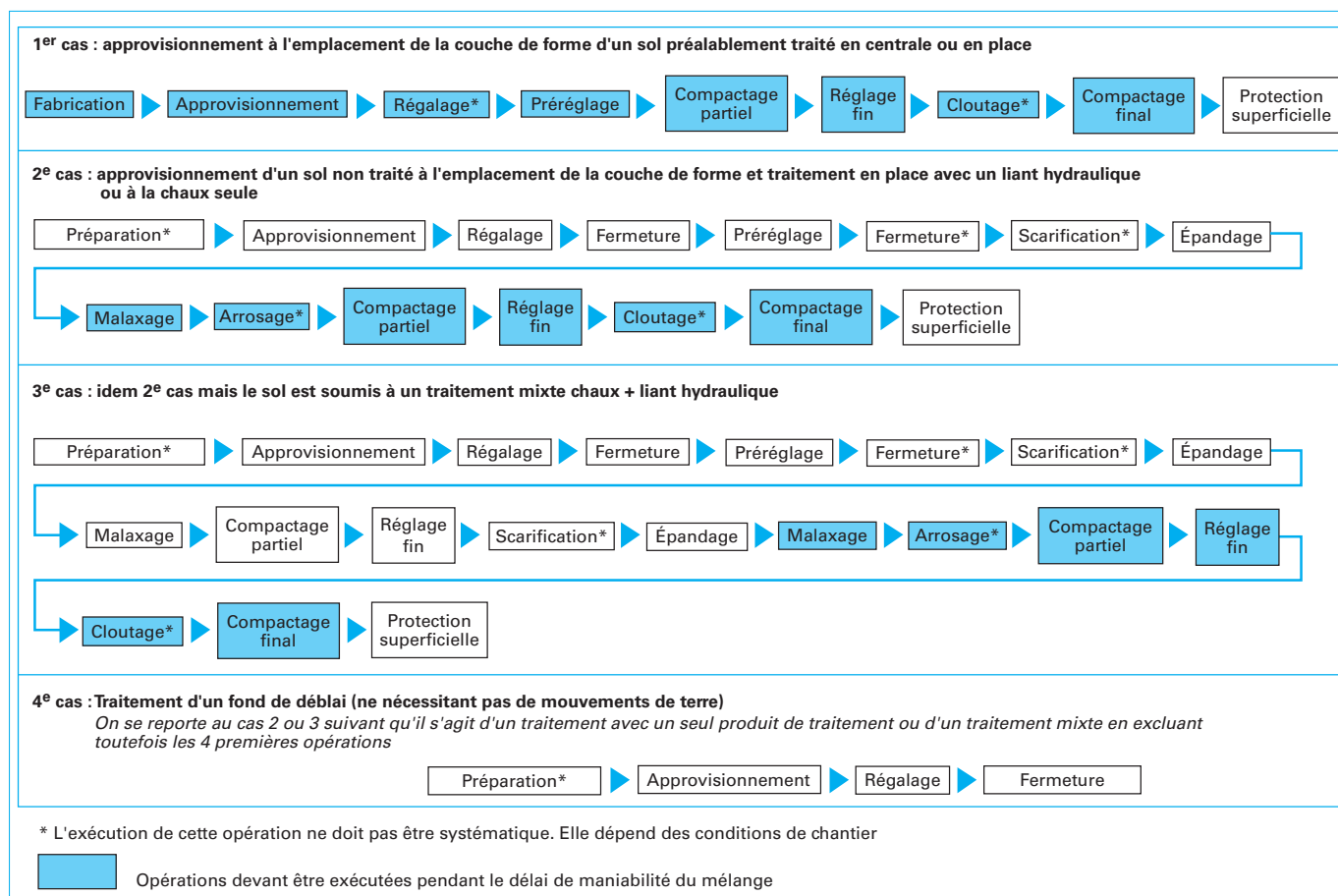


Figure 8 – Ordonnancement des opérations pour quatre cas de chantiers types



Figure 9 – Train de traitement aux liants LHR de matériaux concassés (basaltes). Aire de service d'Heumes, A89 (2004)

10.2.3 Contrôles après le traitement

L'essentiel des suivis porte sur les paramètres ci-dessous :

- mesure de la teneur en eau en vue d'une correction éventuelle (par malaxage supplémentaire) de la quantité d'eau à incorporer ;
- prélèvement conservatoire d'échantillon de liant, pour vérification éventuelle de la conformité ;
- prélèvement éventuel d'échantillons pour la mesure de l'indice portant immédiat (*IPI*) ;
- vérification après le compactage :
 - de la densification, mesurée généralement au gammadensimètre, ou au densitomètre à membrane, ou encore au cône à sable,
 - de la portance à court terme, par la mesure du module sous chargement statique à la plaque EV_2 ou par celle du module dynamique mesuré à la dynaplaque, et à long terme par celle de la déflexion (cf. [C 5 361] § 6.2.2.),
 - des caractéristiques mécaniques au moyen de carottages pour la détermination du couple (R_t , E).

10.2.4 Planches d'essai et de références

En règle générale, des planches d'essai et de références sont réalisées sur les chantiers afin de définir et valider les critères de mise en œuvre des matériaux traités.

Les auteurs remercient Monsieur Havard, ingénieur-conseil, anciennement Adjoint du Directeur technique géotechnique du LCPC.