



Ministère
de l'Équipement,
des Transports,
et du Logement



ISSN 1151-1516

Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Application à la réalisation
des remblais et des couches
de forme

Guide technique

LCPC



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

Page laissée blanche intentionnellement

TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX ET/OU AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Application à la réalisation
des remblais et des couches de forme

Guide technique

Janvier 2000

Document édité par :



Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 52 26
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>



Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
46, avenue Aristide Briand
BP 100
F-92225 BAGNEUX CEDEX
Téléphone : 01 46 11 31 31
Télécopie : 01 46 11 31 69
Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

Ce guide technique a été établi par un groupe de travail composé de MM :

- BIMBARD (LRPC Lyon)
- CHAUVIN (LRPC de Bordeaux)
- CORTÉ (LCPC)
- DIMET (Entreprise Razel)
- FEVRE (LRPC de Rouen)
- GILLOPE (DTC de Rouen)
- HAVARD (LCPC)
- HIERNAUX (LRPC de Saint-Quentin)
- JOUBERT (J.-P.) (SETRA)
- KERGOET (LREP - Melun)
- MOREL (CER de Rouen)
- NGUYEN DAC CHI (LCPC)
- PETITJEAN (SCREG Ile-de-France)
- PUIATTI (Lhoist France)
- PUECH (Scétauroute - DT)
- RECOURT (DTC de Lille)
- SCHAEFFNER (LCPC)
- VALEUX (CER de Rouen)
- VECOVEN (Groupe Origny)

Sa validation a été assurée par MM. Jean-François CORTÉ et Jean-Pierre MAGNAN, Directeurs techniques au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, et Yves GUIDOUX, Directeur d'études au Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

L'animation du groupe de travail et le secrétariat ont été assurés par Marc SCHAEFFNER, Chargé de mission pour les terrassements au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation du LCPC ou du SETRA.

© 2000 - LCPC-SETRA

ISBN : 2-7208-3810-1

Présentation générale

La technique du traitement des sols a été utilisée en France dès la fin des années soixante et, jusqu'au milieu des années soixante-dix, principalement appliquée à la réutilisation en remblai des sols sensibles à l'eau et humides. Elle a ainsi permis de réaliser, dans de bonnes conditions techniques, économiques et de délais, les grands travaux de terrassement nécessités par la construction des programmes autoroutiers du Nord, de l'Est et de l'Ouest de la France, ainsi que l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle. Dès cette époque, il avait été considéré que l'état des connaissances et de l'expérience était suffisant pour qu'un document méthodologique, codifiant la technique du traitement des sols dans cette application particulière, puisse être produit ().*

Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de forme et principalement des couches de forme autoroutières.

Elle a abordé ce domaine d'abord par les sols fins, en développant en particulier la technique du traitement mixte des limons, puis progressivement s'est étendue à une palette de plus en plus large de matériaux, allant des sols fins aux graves argileuses ou propres, voire aux mélanges de sols fins et d'éléments blocailleux. Parallèlement, les techniques d'exécution, les matériels, les produits de traitement se multipliaient et se diversifiaient pour s'adapter aux particularités de cette variété de matériaux. De nombreuses publications ont rendu compte des progrès qui étaient obtenus au fur et à mesure des chantiers [32, 33, 34, 35].

Dans un contexte aussi évolutif, il était difficile, voire non souhaitable, de produire un document méthodologique qui risquait de figer prématurément la technique.

Toutefois, dès la fin des années quatre-vingt, devant la place grandissante occupée par les couches de forme en sols traités dans les grands projets et la prise en compte toujours plus forte de ces couches dans la structure des chaussées, un tel document devenait indispensable.

*Un premier pas a été fait en 1992, avec la parution du GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme) qui, d'une part, précise les classes de matériaux devant subir un traitement pour être utilisés dans des couches de forme et, d'autre part, propose une démarche empirique pour la prise en compte des couches de forme en sols traités dans le dimensionnement des structures de chaussées (en fixant la classe de plate-forme pouvant être atteinte par une couche de forme en sol traité de nature, de performances et d'épaisseur données) (**).*

(*) Il s'agit de la Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux éditée par le LCPC et le SETRA en 1972 et dont le présent Guide technique a repris les principes et apporté des compléments sur des aspects qui n'étaient pas abordés.

(**) Cette démarche est celle reprise dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » ainsi que dans le « Catalogue des structures types de chaussées neuves » édités par le LCPC et le SETRA en 1994 et 1998.

Il restait cependant à préciser tous les aspects d'étude, de réalisation et d'assurance de la qualité de telles couches de forme.

Cette tâche a été confiée à un groupe de travail composé de représentants des maîtres d'œuvre de grands chantiers, des entreprises ayant une grande expérience de la technique, des industriels producteurs des produits de traitement, des ingénieurs des CETE (laboratoires régionaux et divisions terrassements et chaussées), du SETRA et du LCPC.

La mission de ce groupe s'est avérée assez longue, le travail d'analyse des diverses pratiques et la recherche des consensus techniques se sont révélés assez difficiles, car plus de deux décennies d'application plus ou moins ordonnée de la technique avaient inévitablement créé des convictions fortes mais assez souvent divergentes.

Le document présenté comporte trois parties.

■ **La première partie** présente les notions générales relatives à la technique du traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques qui sont communes aux deux domaines d'applications, remblai et couches de forme. La connaissance de ces notions est nécessaire à la compréhension des éléments développés dans les deuxième et troisième parties.

■ **La deuxième partie** développe l'application du traitement des sols dans la construction des remblais. Elle reprend, en les complétant, les éléments figurant déjà dans la recommandation de 1972, mais élargit le domaine du traitement des sols à la construction de certaines parties critiques de remblai (remblais techniques, PST, pieds des hauts remblais, etc.).

■ **La troisième partie**, de loin la plus conséquente, est consacrée au traitement des couches de forme et aborde successivement les aspects :

- études,
- techniques et matériels d'exécution,
- assurance de la qualité.

L'ampleur des développements qui sont présentés ne doit pas surprendre car il faut être bien conscient que si le traitement permet, avec des matériaux, dont beaucoup ne pourraient même pas être utilisés dans des corps de remblais, de réaliser des couches de forme souvent bien plus performantes qu'avec des matériaux granulaires propres traditionnels, c'est au prix d'une importante technicité de tous les acteurs et à l'aide de méthodes rigoureuses et de matériels modernes et performants.

■ **Les annexes** apportent des compléments sur des points particuliers et présentent notamment (annexes 8 et 9) des propositions sur des stipulations techniques adaptées aux marchés prévoyant la réalisation de traitement de sols.

L'observation des principes et recommandations développés dans ce document devrait conduire à plus d'homogénéité dans les pratiques et, de ce fait, assurer une plus grande maîtrise de cette technique dont l'intérêt aux plans technique, économique et environnemental progresse constamment.

Sommaire général

■	Introduction	7
■	Partie A. Notions générales	11
■	Partie B. Traitement des sols en remblais	57
■	Partie C. Traitement des sols en couches de forme	89
	• Introduction	90
	• Partie C1. Études	91
	• Partie C2. Techniques et matériels d'exécution	115
	• Partie C3. Assurance de la qualité	145
■	Annexes	167
■	Abréviations, symboles, définitions	223
■	Bibliographie	225

Page laissée blanche intentionnellement

Objet

Ce guide technique présente les différents aspects (principes généraux, études de laboratoire, techniques et matériels d'exécution, assurance de la qualité, etc.) du traitement des sols avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.

Il synthétise l'expérience française de plus de trente années au cours desquelles cette technique a connu un constant développement.

Domaine d'application

Le document concerne spécifiquement les remblais routiers, les couches de forme et certaines couches de forme-fondation intégrées dans le calcul du dimensionnement de la structure. Il est en cohérence avec le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) », le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » et le « Catalogue des structures types de chaussées neuves », parus respectivement en 1992, 1994 et 1998.

On peut également étendre son application aux ouvrages similaires tels que les remblais ferroviaires ou aéroportuaires, terre-pleins divers pour aires de stockage, parkings, assises de voiries légères, plates-formes industrielles devant supporter des charges roulantes ou des bâtiments, etc. En revanche, son utilisation dans la conception et la construction des ouvrages en terre ayant une fonction hydraulique (éléments de digues, barrages, canaux, etc.) exige des réflexions et considérations particulières qui ne sont pas évoquées dans le document.

Contenu et organisation

Le document comprend trois parties et neuf annexes.

■ Partie A

La **première partie** présente les notions générales relatives à la technique du traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques qui sont communes aux deux domaines d'applications évoqués précédemment.

Sont, en particulier, développés dans cette partie :

- la nature des matériaux en présence,
- l'action des différents produits de traitement sur les différentes classes de sols,
- la méthodologie générale des études de traitement (géotechniques et économiques),
- les aspects généraux de l'assurance de la qualité.

La connaissance de ces notions est nécessaire à la compréhension et la justification des éléments techniques développés dans les parties B et C.

■ Partie B

La **deuxième partie** présente les éléments spécifiques de l'application du traitement à la conception et la construction des remblais routiers.

Deux objectifs sont distingués :

- le premier, le plus fréquemment recherché, est celui de la réutilisation des sols sensibles à l'eau se trouvant, au moment du chantier, dans un état hydrique trop humide pour être réutilisés dans des conditions techniques et économiques acceptables,
- le second est celui de l'application du traitement à la réalisation de certaines parties de remblai devant présenter des caractéristiques mécaniques permanentes et, en général, plus élevées que dans le corps du remblai (PST, remblais techniques, pied des hauts remblais, remblais à talus de forte pente, etc.).

■ Partie C

La **troisième partie** présente l'application de la technique du traitement à la conception et la réalisation des couches de forme. Cette partie est structurée dans le même esprit que la précédente mais, pour cette application, chacun des aspects :

- études,
- techniques et matériels d'exécution,
- assurance de la qualité,

nécessitant des développements approfondis, a fait l'objet d'une présentation dans des chapitres séparés dont le contenu est résumé ci-après.

● Partie C1 « Études »

- tolérances des dispersions des caractéristiques des sols acceptables pour autoriser leur traitement en vue de constituer une couche de forme,
- méthodologie des études de formulation aboutissant à la détermination du produit de traitement et de son dosage permettant d'obtenir le niveau de performances mécaniques recherché.

● Partie C2 « Techniques et matériels d'exécution »

- analyse des différentes opérations élémentaires requises pour la réalisation d'une couche de forme en sol traité,
- ordonnancement de ces différentes opérations en tenant compte du délai de maniabilité du mélange,
- caractéristiques des matériels adaptés à cette nature de travaux (épandeurs, malaxeurs, compacteurs, engins de réglage fin, etc.) ainsi que les modalités d'exécution de certaines techniques particulières (préparation des sols à traiter, réglage, cloutage, protection superficielle, etc.).

● Partie C3 « Assurance de la qualité »

- aspects à considérer dans la formulation des stipulations à préconiser dans un marché de travaux de couche de forme en sol traité,
- éléments à considérer dans l'établissement du Plan d'assurance de la qualité (PAQ) et dans le Schéma directeur de la qualité (SDQ),
- liste de points d'arrêt et les actions à mener pour les lever, en particulier la consistance de l'épreuve de convenance.

■ Annexes

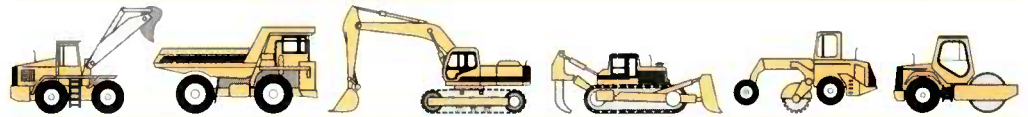
Les annexes complétant le document développent les aspects suivants :

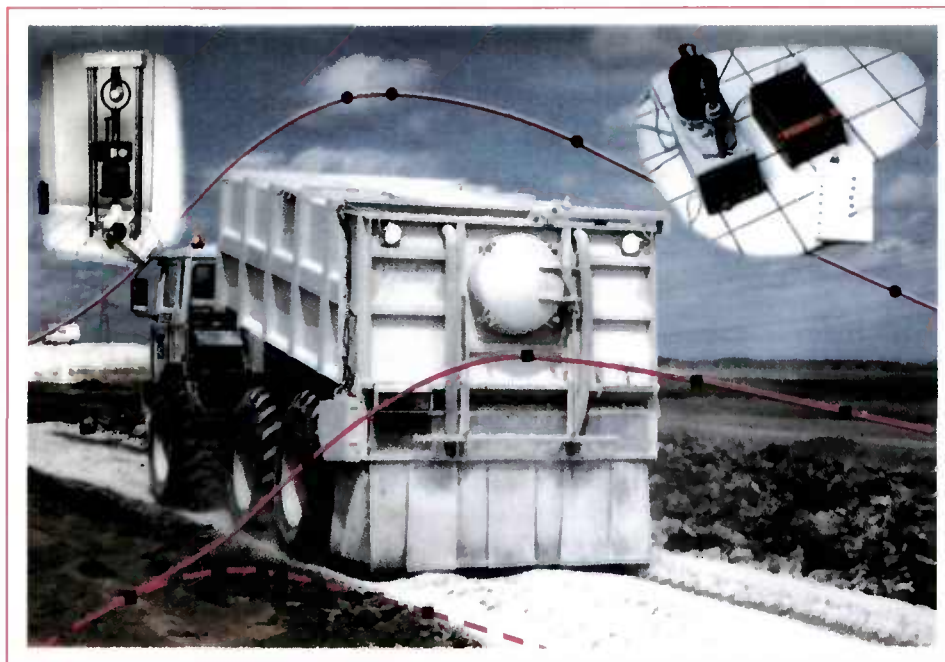
- 1 informations complémentaires relatives à la chaux aérienne ;
- 2 informations complémentaires relatives aux ciments ;
- 3 informations complémentaires relatives aux liants routiers hydrauliques ;
- 4 méthode rapide de comparaison économique entre la technique de substitution par recours aux emprunts et la technique du traitement de sol (pour remblai et couche de forme) ;
- 5 règles pratiques relatives à la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de chaux ou de liants hydrauliques ;
- 6 méthodes pratiques pour la détermination du coefficient de variation des épandeurs et pour le contrôle de la masse surfacique épandue ;
- 7 évaluation de la sensibilité des performances aux dispersions d'exécution et méthode d'ajustement du dosage en liant permettant de les compenser ;
- 8 éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement pour réemploi en remblai des sols sensibles à l'eau humides ;
- 9 éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement des sols pour réalisation de couches de forme.

L'essentiel des connaissances actuelles régissant l'application de la technique du traitement des sols sont synthétisées dans ce guide. Toutefois, il existe encore des aspects où ces connaissances doivent être améliorées ; c'est le cas, notamment, pour ce qui concerne :

- le comportement au gel des sols traités,
- les modalités de transposition des résultats de laboratoire aux conditions réelles de chantier,
- les actions d'assurance de la qualité portant sur la vérification *a posteriori* des performances obtenues (méthodologie de la réalisation des carottages, contrôles après mélange de la teneur en produit(s) de traitement, etc.),
- les matériels et les techniques d'exécution (précision de l'épandage et de l'humidification, compactage en fond de couche, limitation du feuilleteage au compactage, réduction des émissions de poussières de produit de traitement, etc.).

Sur ces points, les dispositions préconisées dans le document sont celles admises généralement à l'heure actuelle, mais elles sont susceptibles d'être modifiées à la lumière des résultats des études en cours et de l'expérience des chantiers futurs.





Notions générales

Les matériaux en présence

Principes d'action des produits de traitement sur les sols

Méthodologie générale des études de traitement des sols

Matériels de traitement des sols

Aspects généraux de l'assurance de la qualité des travaux de traitement des sols

Résumé

Cette première partie développe les notions générales régissant le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques appliqué à la construction des remblais et des couches de forme.

■ La première catégorie de notions présentée concerne les paramètres d'identification des sols, de la chaux, des liants hydrauliques et les principes régissant les interactions de ces matériaux lorsqu'ils sont mis en présence.

• Les paramètres d'identification des sols, de la chaux et des liants hydrauliques, reconnus comme significatifs vis-à-vis du traitement, sont :

➤ pour les sols : la granularité, l'argilosité, les teneurs en constituants physico-chimiques particuliers (matières organiques, phosphates, sulfates, sulfures, nitrates, chlorures, etc.), l'état hydrique, l'état de compacité en place et, éventuellement, la fragmentabilité et l'abrasivité ;

➤ pour la chaux aérienne calcique, principalement concernée dans le traitement des sols, les paramètres d'identification importants vis-à-vis du traitement sont : la forme sous laquelle elle est introduite dans le sol (vive, éteinte, lait de chaux), sa teneur en chaux libre, sa granularité et, pour la chaux vive, sa réactivité à l'eau ;

➤ pour les liants hydrauliques, constitués par les ciments et les liants spéciaux routiers (LSR), les paramètres significatifs sont : la proportion et la nature de leurs constituants (clinker, laitiers, cendres volantes, etc.). Ces paramètres conditionnent le niveau des performances pouvant être atteint, la cinétique de la prise hydraulique et la plus ou moins bonne adaptation du produit aux différents constituants des sols.

• Les principes régissant les interactions entre sols, chaux et liants hydrauliques diffèrent sensiblement suivant la nature des matériaux en présence. La connaissance de ces principes permet de réaliser une bonne adéquation entre sols et produits de traitement pour un chantier donné.

➤ l'action des liants hydrauliques est principalement due à la prise hydraulique qui produit la cimentation des éléments granulaires présents dans le sol. Les résistances ainsi conférées au sol traité sont dépendantes de nombreux facteurs (âge, dosage, nature du liant et du sol, compacité, etc.) ;

➤ l'action de la chaux et des liants spéciaux routiers riches en chaux, plus complexe, comporte plusieurs aspects. Tout d'abord, il se produit sur les sols argileux une réduction instantanée importante de l'argilosité (par floculation et réduction concomitante de l'indice de plasticité), ainsi qu'une modification de son état hydrique (réduction ou élévation de la teneur en eau suivant la forme sous laquelle elle est introduite). Ces actions, dites immédiates, sont mobilisées pour la réutilisation en remblai de sols sensibles à l'eau, trop humides et pour ajuster, si nécessaire, l'état hydrique dans le cas du traitement des sols argileux utilisés en couche de forme. En plus de ces actions immédiates, la chaux aérienne et les liants spéciaux routiers riches en chaux agissent sur la fraction argileuse du sol pour former des espèces liantes de mêmes natures que celles produites par les liants hydrauliques. Cette action, dénommée pouzzolanique, se développe selon une cinétique plus lente et conduit généralement à des niveaux de résistance plus faibles que l'action de prise hydraulique obtenue avec des ciments, mais pouvant s'avérer tout à fait suffisants eu égard à l'objectif visé.

Sur les matériaux calcaires poreux et humides, et notamment la craie, la chaux agit selon un processus encore différent dénommé syntaxie. Cette action liée à la recarbonatation de la chaux produit une élévation de la résistance des granulats et leur cimentation.

Enfin, il faut savoir, d'une part, que les prises d'origine hydraulique aussi bien que pouzzolanique peuvent être perturbées par la présence dans le sol de constituants tels que matières organiques, sulfates, nitrates et, d'autre part, que la cinétique de ces prises est très dépendante de la température (interruption en dessous de 5°C).

■ La deuxième catégorie de notions présentées est relative aux aspects généraux de la méthodologie des études géotechniques et économiques destinées à justifier l'application de la technique du traitement de sol à un cas de chantier donné.

• Les études géotechniques comportent principalement deux volets :

➤ le premier volet concerne la qualification des sols à traiter (identification, localisation dans le gisement, aptitude au traitement et choix du produit de traitement techniquement le mieux adapté, etc.) ;

➤ le second volet est celui des études de formulation (détermination des quantités de produit à introduire dans le sol).

Pour chacun d'eux, il s'agit d'établir un programme permettant de répondre progressivement aux questions particulières posées par le traitement à chacune des phases d'élaboration du projet (faisabilité, avant-projet, projet soumis à l'appel d'offres, projet d'exécution).

• Les études économiques consistent à comparer l'estimation du coût de la solution traitement à celui de solutions alternatives traditionnelles. Cette comparaison doit notamment se faire à partir d'une analyse affinée des différentes composantes du coût (direct et indirect) de chaque solution. Les difficultés de ces études ont pour principale origine :

➤ dans le cas de la réutilisation en remblai de sols humides, les aléas liés aux quantités de matériaux qui seront réellement traitées et aux dosages nécessaires ;

➤ dans le cas de traitement en couche de forme, au coût réel des opérations d'homogénéisation et de malaxage.

Le document décrit, en particulier, les contextes de chantier pour lesquels la solution du traitement présente des probabilités croissantes de s'imposer.

■ La troisième catégorie de notions concerne les matériels (stockage et épandage des produits, préparation des sols, malaxage en place, centrale de fabrication, arrosage, compactage, réglage et protection superficielle des plates-formes) qui sont communs aux différentes applications du traitement.

Des éléments complémentaires sur les matériels et les techniques d'exécution sont, par ailleurs, précisés dans les parties B et C du document pour ce qui concerne les aspects spécifiques aux applications traitées dans ces parties.

Cette première partie se termine par le rappel des notions générales relatives aux concepts de l'assurance de la qualité appliqués aux marchés publics de travaux de traitement de sols et, en particulier, les critères au travers desquels la pertinence de stipulations adaptées à cette nature de travaux peut être évaluée. Toutefois, la qualité requise pour le traitement des sols étant spécifique à l'application visée, l'essentiel de ce sujet est développé dans les parties B et C du document. Il est, cependant, mis l'accent sur un aspect de la qualité, commun à toutes les applications, de la technique qui est la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produits de traitement. Les éléments pratiques permettant d'assurer cette protection sont, quant à eux, décrits dans l'annexe 5.

Sommaire

1. Les matériaux en présence	14
■ 1.1. Les sols	14
■ 1.2. Les produits de traitement	17
■ 1.3. L'eau présente dans les sols	20
2. Principes d'action des produits de traitement sur les sols	20
■ 2.1. Action de la chaux aérienne	20
■ 2.2. Action des liants hydrauliques	26
3. Méthodologie générale des études de traitement des sols	28
■ 3.1. Progressivité des études	28
■ 3.2. Études géotechniques	30
■ 3.3. Études économiques	32
4. Matériels de traitement des sols	36
■ 4.1. Matériels de stockage des produits de traitement	36
■ 4.2. Matériels d'épandage	39
■ 4.3. Matériels de préparation des sols	42
■ 4.4. Matériels de malaxage des sols en place	43
■ 4.5. Matériels d'arrosage	48
■ 4.6. Centrales de fabrication	49
■ 4.7. Matériels de compactage	49
■ 4.8. Matériels de réglage et de protection superficielle	49
5. Aspects généraux de l'assurance de la qualité des travaux de traitement des sols	49
■ 5.1. Rappels des principes de la démarche de l'assurance de la qualité	49
■ 5.2. Pertinence des stipulations techniques	50
■ 5.3. Protection de l'environnement vis-à-vis des poussières de chaux ou de liants hydrauliques	51
■ 5.4. Sécurité des personnes	51

Les notions générales développées dans cette première partie constituent les connaissances de base nécessaires à la compréhension et à la maîtrise de la technique du traitement des sols dans ses applications à la réalisation des remblais et des couches de forme.

Elles concernent :

- les propriétés des sols significatives vis-à-vis de leur traitement et celles des différents produits de traitement pouvant être envisagés ainsi que les divers phénomènes régissant leurs interactions,
- la méthodologie générale des études géotechniques et économiques à entreprendre pour définir les choix des produits de traitement et les dosages en vue de réaliser la nature d'ouvrage envisagée,
- quelques éléments généraux sur les aspects matériels et techniques d'exécution, ainsi que sur l'assurance de la qualité de ce type de travaux.

L'application particulière de la technique du traitement à la réalisation des remblais routiers et des couches de forme requiert, par ailleurs, des connaissances spécifiques complémentaires développées respectivement dans les parties B et C du document.

1. Les matériaux en présence

La recherche de la meilleure adéquation (technique et économique) entre produits de traitement et matériaux à traiter, pour une application donnée (remblai, couche de forme, assise de chaussée), implique de caractériser ces matériaux à partir de paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement des sols.

■ 1.1. Les sols

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

● 1.1.1. Paramètres caractérisant la nature des sols

➤ a. La granularité

la granularité déterminée par l'analyse granulométrique (cf. norme NF P 94-056 et NF P 94-057) et plus particulièrement :

- **la valeur du D_{\max}** (dimension des plus gros éléments présents dans le sol). Cette caractéristique régit, en particulier, les possibilités pratiques de réaliser le mélange du sol avec le produit de traitement ;
- **le tamisat à 0,08 mm** (ou teneur en fines). Cette caractéristique qui exprime la finesse du matériau oriente en grande partie le choix du produit de traitement (cf. § A-2.) ;

➤ le **coefficient d'uniformité** $C_U = D_{60}/D_{10}$. Cette caractéristique fournit, dans le cas des matériaux granulaires, une information qualitative sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre le niveau de résistance visé. En effet, toutes choses égales par ailleurs, plus ce coefficient est faible, c'est-à-dire plus la granularité du matériau est homogène, plus faible sera la masse volumique apparente pouvant être atteinte et donc plus importante devra être la quantité de produit de traitement à prévoir pour atteindre le niveau de performance visé (ou plus l'apport d'un correcteur granulaire sera justifié).

➤ b. L'argilosité

Cette caractéristique intervient, en premier lieu, dans le type d'application pouvant être envisagée (remblai ou couche de forme, cf. parties B et C) et dans le choix du produit de traitement (cf. § A-2.). Dans une moindre mesure, les conditions de réalisation du mélange dépendent également de ce paramètre. En première approche, on peut considérer que plus l'argilosité est élevée, plus la chaux s'impose de préférence aux liants hydrauliques.

L'argilosité s'exprime par l'une ou l'autre des deux grandeurs suivantes :

- l'**indice de plasticité** (I_p), mesuré suivant la norme NF P 94-051. Pour être correctement interprété, cet indice doit, de plus, être précisé par la valeur du tamisat à 0,08 mm (ou 0,4 mm) du sol ;
- la **valeur au bleu de méthylène du sol** (V_{BS}), mesurée suivant la norme NF P 94-068.

➤ c. Les teneurs en constituants chimiques particuliers

Des constituants chimiques particuliers peuvent être présents dans certains sols : matières organiques, phosphates, nitrates, chlorures, sulfates, sulfures, etc. Leurs effets sur le déroulement de la prise hydraulique sont variables :

- **les matières organiques**. Suivant leur proportion dans le sol, elles consomment « en priorité » une quantité plus ou moins importante de produit de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu, quantité qui est alors perdue pour le développement des réactions de cimentation ;
- **les phosphates et les nitrates**. Leur action est complexe. On retiendra que le plus souvent ils sont inhibiteurs ou pour le moins retardateurs de la prise hydraulique. Leur présence dans les sols est relativement rare et résulte principalement des épandages intensifs d'engrais chimiques ;
- **les chlorures**. Ils ont, en général, une action d'accélérateur de prise et de durcissement avec simultanément possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates (dans le cas où ce sont les aluminates qui ont été formés en majorité). Une étude de la cinétique de prise est nécessaire pour décider de l'abandon éventuel de la technique ;
- **les sulfates et les sulfures**. Ce sont les constituants qui présentent la plus forte probabilité de présence dans les sols (sous forme de gypse ou de pyrites) et dans les matériaux de démolition (sous forme de plâtrats). Par expérience, ce sont eux qui s'avèrent les plus néfastes, car leur action peut déjà être très dommageable pour des teneurs de l'ordre de 1 %. En début de prise, ces constituants ont un rôle généralement bénéfique de régulateur de prise, mais, si l'alimentation en sulfates ou sulfures et en eau est suffisante, leur action se poursuit par la formation d'ettringite, espèce cristalline très gonflante pouvant entraîner la destruction



Essai au bleu de méthylène à la tache.

de la prise hydraulique [24] [36]. Un prétraitement à la chaux réalisé largement (plusieurs semaines voire plusieurs mois) avant le traitement principal peut alors être une solution au problème en provoquant la formation de l'ettringite avant la mise en œuvre définitive du mélange, si l'on peut considérer qu'aucune alimentation en ions SO_3 ne se produira plus par la suite.

Remarque. Bien que la présence de ces constituants ait une incidence souvent importante sur le déroulement de la prise hydraulique, la mesure de leur teneur dans les sols n'est pas à envisager de manière systématique en raison de la complexité des méthodes de mesures et de la faible représentativité des prises d'essai (quelques grammes en général). Pour apprécier le risque d'un comportement anormal, il est préférable de réaliser un essai de comportement spécifique dénommé « essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/aux liants hydrauliques » défini par la norme NF P 94-100 (cf. § C1-2.1.).

Si les résultats de cet essai font apparaître une anomalie, il est alors souvent justifié de procéder à des investigations plus complètes pour rechercher l'explication de l'incompatibilité du sol avec le produit de traitement utilisé et, le cas échéant, rechercher des parades possibles : recherche d'un liant spécifiquement adapté, prétraitement à la chaux et maintien du sol dans l'état prétraité, un temps suffisamment long, plusieurs semaines, voire plusieurs mois, permettant à l'ettringite de se former en totalité avant d'engager le traitement avec le liant hydraulique.

En revanche, la mesure du pH du sol peut être envisagée de manière assez systématique étant donné la simplicité de sa détermination. La connaissance de ce paramètre est intéressante principalement pour évaluer la présence d'acides humiques et, éventuellement, pour conforter les regroupements des sols en familles opérés au stade des études de qualification des sols (cf. § A-3.2.1.).

● 1.1.2. Paramètres caractérisant l'état des sols

Il s'agit principalement de caractériser l'état hydrique et, pour certains d'entre eux, leur état de compacité en place.

➤ a. L'état hydrique

Il intervient pour :

- le choix du ou des produits de traitement et des dosages à introduire dans le sol,
- le bon déroulement des réactions de prise et de durcissement,
- les conditions de mise en œuvre : épandage, malaxage, compactage, arrosage éventuel.

Il s'exprime par l'une ou l'autre des grandeurs suivantes (cf. GTR) :

➤ le **rapport $w_{\text{nat}}/w_{\text{OPN}}$** , mesuré suivant les normes NF P 94-050 et NF P 94-093. Ce paramètre est le mieux adapté pour caractériser les états hydriques « moyen », « sec » et « très sec » ;

➤ l'**indice portant immédiat (IPI)** du sol à sa teneur en eau naturelle, mesuré suivant la norme NF P 94-078. C'est le paramètre le mieux adapté pour caractériser les états hydriques « humide » et « très humide » ;

➤ l'**indice de consistance (I_c)**. Le paramètre

$$I_c = \frac{w_L - w_{\text{nat}}}{w_L - w_p}$$

situe la teneur en eau naturelle du sol (w_{nat}) par rapport à ses limites d'Atterberg mesurées suivant les normes NF P 94-050 et NF P 94-051. Il est bien adapté pour caractériser l'ensemble des états hydriques des sols, mais son interprétation est limitée aux sols ayant une fraction inférieure ou égale à 0,08 mm supérieure à 35 % et un indice de plasticité supérieur à 12 (cf. norme NF P 11-300).

➤ b. L'état de compacité en place

La connaissance de cette caractéristique est intéressante pour certains sols tels que les craies [18] et les calcaires, car elle est en relation étroite avec leur fragmentabilité. Elle apporte donc une information sur les conditions pratiques d'exécution du malaxage.

L'état de compacité en place se détermine par l'essai « mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de roche déshydratée », défini par la norme NF P 94-064.

● 1.1.3. Paramètres caractérisant le comportement

Il s'agit de paramètres visant principalement à mieux prévoir les conditions pratiques de malaxage.

➤ a. La fragmentabilité des éléments grossiers (supérieurs à 50 millimètres)

Cette caractéristique devrait permettre d'appréhender la limite de réalisation pratique du malaxage avec des outils animés (pulvérisateurs de sols principalement). Elle se détermine sur la fraction blocailleuse (50/D_{max}) du sol par « l'essai de fragmentabilité » applicable aux matériaux rocheux évolutifs, défini par la norme NF P 94-066, mais le calage des seuils est encore à préciser.

➤ b. L'abrasivité de la fraction grenue (supérieure à 0,08 millimètres)

Cette caractéristique est responsable de l'usure plus ou moins rapide des outils de malaxage. La connaissance de la nature pétrographique de la roche mère dont est issu le sol à traiter constitue une première indication, mais l'expérience a montré qu'elle est souvent insuffisante et quelquefois même non significative ❶.

Remarque. Les paramètres d'identification présentés comme significatifs vis-à-vis du traitement, à l'exception de l'abrasivité et des teneurs en nitrates, sulfures et sulfates, sont également ceux qui ont été pris en considération dans la classification des matériaux décrite dans le GTR et dans la norme NF P 11-300. Autrement dit, dès lors que les sols ont été reconnus et classés selon ce système de classification, il est déjà possible d'évaluer, avec une bonne approximation, l'intérêt de les traiter et le (ou les produits) de traitement le (ou les) mieu(x) adapté(s) à la nature de l'ouvrage envisagé.



Essai d'abrasivité de la fraction grenue.

❶ Une mesure directe inspirée de l'essai d'abrasivité (norme XP P 18-579) utilisé pour évaluer l'usure des outils de foration dans les massifs rocheux peut être envisagée (après avoir éliminé la fraction argileuse de l'échantillon soumis à l'essai).

❷ L'utilisation de chaux aériennes magnésiennes peut éventuellement être envisagée, mais l'efficacité de ces chaux est moindre que celle des chaux calciques en raison de leur faible réactivité. Par ailleurs, il est possible que, dans le cas de fortes cadences de mise en œuvre, ce retard d'hydratation puisse, pour les moins réactives d'entre elles, être à l'origine de gonflements différés.

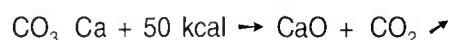
Les chaux hydrauliques sont, quant à elles, à considérer en tant que liants hydrauliques, mais leur utilisation en traitement de sols n'a pas jusqu'à présent été significativement développée.

■ 1.2. Les produits de traitement

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques ❷ et les liants hydrauliques.

● 1.2.1. La chaux aérienne [42]

Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO₃ Ca) à une température d'environ 900 °C suivant la réaction :



La réaction étant réversible, la chaux vive produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante, se recarbonater lentement sous l'action du CO₂ atmosphérique avec formation d'une prise à l'air d'où la qualification de « chaux aérienne » (par opposition à « chaux hydraulique »).

La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques (cf. § A-2.1.1.).

① Dans l'attente d'une norme EN, actuellement en préparation.

② Un activant pour élever le pH n'est, en effet, pas toujours nécessaire puisque le clinker Portland peut jouer ce rôle.

Des indications complémentaires concernant le mode de fabrication, l'implantation en France des unités de production, les caractéristiques et usages des différentes chaux aériennes, sont données dans l'annexe 1.

Les caractéristiques importantes des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols sont :

- **la forme sous laquelle elle est utilisée** : chaux vive, chaux éteinte ou lait de chaux,
- **sa teneur en chaux libre** : exprimée sous la forme de CaO,
- **sa granularité** : définie à partir de ses tamisats à 2 , 0,2 et 0,08 millimètres,
- **sa réactivité** : cette caractéristique est déterminée par l'essai dit « de réactivité à l'eau » réalisé selon la norme NF P 98-102. Elle représente la vitesse d'hydratation de la chaux vive et peut s'interpréter comme un test global de la qualité de la chaux, car elle prend en compte à la fois la qualité de la cuisson, le taux de chaux libre et la finesse de broyage. Elle présente donc un intérêt pratique indéniable et ceci d'autant plus que l'essai est simple et rapide. Son application est cependant limitée à la chaux vive, évidemment.

La norme NF P 98-101 ① précise les valeurs des caractéristiques devant être respectées par les chaux aériennes utilisables en technique routière. Les principales d'entre elles sont d'ailleurs rappelées dans l'annexe 1.

● 1.2.2. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène, dénommé couramment « prise hydraulique », confère au sol une cohésion permanente dont l'importance dépend :

- de la **nature du matériau**,
- du **type de liant**,
- de la **quantité introduite**,
- de la **compacité atteinte** à la mise en œuvre,
- de la **température du milieu et de l'âge du mélange**.

Les liants hydrauliques sont des mélanges comportant, en proportion éminemment variables suivant les produits (cf. § A-1.2.2.a.) :

- des matériaux hydrauliques faisant prise en présence d'eau : clinker Portland, cendres volantes sulfocalciques de charbon, etc.,
- des matériaux pouzzolaniques faisant prise en présence d'eau à pH élevé (≥ 12) : laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes silico-alumineuses, pouzzolanes naturelles,
- si nécessaire ②, un ou plusieurs activants dont le rôle principal est l'élévation du pH du milieu pour déclencher la prise hydraulique des matériaux pouzzolaniques,
- différents ajouts éventuels destinés à leur conférer des propriétés spécifiques (sur la cinétique de prise, par exemple).

Les liants hydrauliques concernés par la technique du traitement des sols sont respectivement les ciments et les liants spéciaux routiers (LSR).

➤ a. Les ciments

Ce sont des liants hydrauliques conformes aux normes NF P 15-300 et NF P 15-301. Les modalités de leur identification sont précisées, notamment, dans les normes NF P 15-431 ; NF P 15-433 ; NF P 436 ; XP P 15-466 ; P 15-467 ; P 15-474 et NF EN 196-1 ; NF EN 196-2 ; NF EN 196-3 ; NF EN 196-6 ; NF EN 196-7.

Dans l'application au traitement des sols, seuls les « ciments courants », au sens des normes précitées, sont utilisés. Il est probable, toutefois, que d'autres ciments (ciment à maçonner, ciment naturel, chaux hydrauliques naturelle et artificielle, etc.) soient technique-

ment également utilisables, mais les conditions économiques dans lesquelles ils sont fabriqués n'ont pas encore permis d'envisager leur emploi à une échelle significative.

Les caractéristiques des ciments courants sont définies dans la norme NF P 15-301 (révisée en 1994) et leurs valeurs sont certifiées (l'AFNOR constituant l'organisme certificateur). Cette norme propose une classification des différents ciments établie, d'une part, selon leur composition et, d'autre part, selon leurs performances mécaniques.

L'utilisation de ciments apporte donc une garantie notable sur leurs propriétés et leur homogénéité.

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland (appellation courante : clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1 450 °C, d'un mélange dénommé « cru » composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Au cours de la cuisson, le cru est tout d'abord déshydraté (jusqu'à 550 °C), puis décarbonaté (de 550 à 900 °C) et enfin clinkerisé (de 900 jusqu'à 1450 °C). Au terme de la clinkerisation qui a produit une fusion partielle du cru, ce dernier est transformé en silico-aluminates et ferro-aluminates de calcium anhydres, facilement solubles dans l'eau.

Après refroidissement, et ajout des éventuels constituants d'apport, le mélange est finement broyé et homogénéisé (D_{\max} des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique « Blaine » comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g). Le produit final est composé de constituants qui, en présence d'eau, se dissolvent quasi instantanément avec formation de précipités de gel de silicates et de ferro-aluminates de calcium. Ce gel s'hydrate progressivement et se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol (cf. § A-2.2.2.).

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice etc, ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

Une préoccupation essentielle dans la fabrication des ciments est la recherche de la plus grande homogénéité dans la fabrication du cru tout d'abord, puis dans celle de l'ajout des différents autres constituants qui s'opère lors du broyage.

Des compléments sur les ciments sont donnés dans l'annexe 2.

➤ **b. Les liants spéciaux routiers (LSR) (ou liants hydrauliques routiers LHR) ①**

Des liants spéciaux routiers (LSR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées [26].

Dans l'attente d'une norme ②, ils font l'objet d'avis techniques délivrés par le Comité français pour les techniques routières (CFTR) ③.

Ces avis techniques se limitent, toutefois, à garantir que le LSR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

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

① La dénomination liants spéciaux routiers (LSR) est d'usage courant en France actuellement, elle est toutefois appelée à être remplacée dans la norme EN en préparation sur ces produits par « liants hydrauliques routiers (LHR) ».

② En préparation au niveau européen au 1er janvier 2000.

③ Le CFTR est une instance paritaire Administration-Profession qui, à la demande d'un fabricant, délivre un avis sur l'intérêt présenté par l'utilisation d'un LSR donné dans des cas de chantiers particuliers ; l'instruction des dossiers est faite sur la base d'une évaluation des conditions de fabrication du produit et des résultats obtenus sur un échantillon de chantiers « témoins » représentatifs.

❶ En utilisant pour la confection des éprouvettes et pour le bain thermostaté l'eau du milieu concerné.

Les LSR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.) ;
- leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier. En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier.

En contrepartie, l'absence, jusqu'à présent, de normalisation de procédure de certification gêne en partie le développement de ces produits (du fait, notamment, de la nécessité de pratiquer des études plus détaillées qu'avec des ciments (cf. § A-2.2.2. et § C1-2.2.)).

Des compléments sur les liants spéciaux routiers sont donnés dans l'annexe 3.

■ 1.3. L'eau présente dans les sols

La présence éventuelle d'ions H, SO₃, NO₃, PO₄, Cl₂, etc. dans l'eau libre retenue dans le sol (ou, le cas échéant, dans l'eau apportée pour ajuster leur état hydrique) peut modifier sensiblement et dans un sens défavorable l'action des différents produits de traitement sur les sols (cf. § A-1.1.1.c.). Lorsque le contexte, notamment géologique, laisse présager un risque significatif de présence de ces ions dans l'eau libre du sol, il convient de procéder à quelques essais d'aptitude du sol au traitement tel que défini dans la norme NF P 94-100 ❶ et, tout particulièrement, lorsque l'objectif du traitement est la réalisation de couche de forme (cf. § C1-2.1.).

Pour ce qui concerne l'eau d'apport, sa nature doit être conforme à la norme NF P 98-100 type 1 (ou, éventuellement, type 2 après vérification par une étude spécifique).

2. Principes d'action des produits de traitement sur les sols

■ 2.1. Action de la chaux aérienne

L'incorporation de chaux dans un sol provoque [6] [11] [44] :

- des actions, dites « immédiates », qui se produisent dès l'instant où le mélange sol-chaux est constitué ;
- des actions, dites « à long terme », qui se poursuivent durant plusieurs mois, voire plusieurs années après la mise en œuvre du sol traité.

● 2.1.1. Actions immédiates

Elles portent sur l'état hydrique et, le cas échéant, sur l'argilosité du sol.

➤ a. Modifications de l'état hydrique

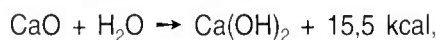
Ces modifications dépendent de la forme (vive, éteinte, lait) sous laquelle la chaux se trouve et de la quantité introduite.

Ainsi :

☐ La chaux vive

provoque un abaissement de la teneur en eau du sol par l'action combinée des trois phénomènes suivants :

— *hydratation de la chaux vive* selon la réaction :



— *vaporisation d'une certaine quantité d'eau* produite par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive (15,5 kcal/mole),

— *apport de matière sèche* (chaux éteinte) qui réduit le rapport :

$$\frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids de solide}}$$

définissant le calcul de la teneur en eau.

L'importance relative de ces trois phénomènes est sensiblement égale et on peut retenir que l'abaissement total de teneur en eau provoqué par l'incorporation de chaux vive dans un sol est approximativement de 1 % de teneur en eau par pour-cent de chaux vive introduite [7].

☐ La chaux éteinte

agit également sur la teneur en eau, mais cette fois uniquement par le phénomène d'apport de matière sèche, c'est-à-dire que l'abaissement total n'est plus que de l'ordre de 0,3 % de teneur en eau par pour-cent de chaux éteinte introduite.

☐ Le lait de chaux

produit à l'inverse une élévation de la teneur en eau qui est fonction de sa concentration (masse de CaO par litre d'eau) et de la quantité mélangée avec le sol.



Centrale de fabrication de lait de chaux (par extinction de chaux vive).



Épandage de lait de chaux pour traitement en couche de forme d'un sol argileux.

Remarque. Le traitement sur le chantier étant souvent réalisé par conditions atmosphériques évaporantes, la réduction de teneur en eau constatée est souvent très supérieure à celle provoquée par la seule incorporation de la chaux. Dans ces conditions, des pertes d'eau atteignant 4 à 6 % sont souvent constatées sur les chantiers. Cet assèchement, qui se produit principalement durant le malaxage, peut être bénéfique (cas de la réutilisation en remblai de sols trop humides) ou, au contraire, préjudiciable car devant être compensé par un arrosage complémentaire (cas fréquemment rencontré en traitement pour couche de forme).

➤ b. Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Dès son incorporation dans un sol argileux humide, la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Cette floculation se traduit géotechniquement par :

┌ Une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification concomitante significative de sa limite de liquidité

Il y a donc réduction de l'indice de plasticité. Ainsi comme indiqué sur la figure A-1, si une certaine quantité de chaux vive est introduite dans un sol argileux dont la teneur en eau naturelle w_{nat} se situe dans le domaine plastique, la réduction de l'indice de plasticité qui se produit en concomitance avec celle de la teneur en eau modifie radicalement le comportement du sol. Celui-ci passe brutalement de l'état plastique, c'est-à-dire déformable, collant, à l'état solide, c'est-à-dire rigide, frottant et fragile. Dans cet état, il devient alors facile à travailler (extraire, charger, décharger, circuler, régaler, compacter, etc.).

┌ Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol

Elle s'opère en même temps que le changement d'état décrit précédemment et se traduit par une élévation de l'IPI dont l'ampleur dépend, toutes choses égales par ailleurs, de l'état hydrique du sol avant traitement. Dans le cas du traitement à la chaux vive limité à la réutilisation de sols trop humides, on constate généralement que l'efficacité du traitement est maximale lorsque l'état hydrique du sol se situe aux alentours de 1,1 à 1,3 w_{OPN} (ou, dans le cas de sols fins, lorsque la w_{nat} est voisine de la w_p). En effet, dans ces conditions d'état, on peut en général réutiliser le sol avec des dosages n'excédant pas 1 %. Si l'humidité dépasse sensiblement ces valeurs, les dosages nécessaires croissent alors rapidement car il faut tout d'abord hydrater une quantité de chaux vive importante pour assécher le sol jusqu'à revenir à l'état hydrique évoqué précédemment. Si, au contraire, l'état hydrique du sol est « moyen » et *a fortiori* « sec », situation qui peut se présenter principalement dans le cas du traitement mixte de sols pour utilisation en couche de forme, l'incorporation de chaux vive (mais aussi éteinte) va conduire également à une forte augmentation de l'IPI, comme le montre la figure A-2. Cette augmentation de la rigidité devient alors un handicap car elle rend le sol traité beaucoup plus difficile à compacter et nécessite de prendre des dispositions particulières telles que : arrosage, surcompactage, traitement au lait de chaux, etc. évoquées dans la suite.



Essai Proctor.

┌ Une modification des caractéristiques de compactage du sol

Comme le montre la figure A-2, la courbe « Proctor » du sol traité s'inscrit en dessous et à droite de celle du sol naturel. Cette tendance s'observe quelle que soit l'énergie de compactage appliquée et est d'autant plus marquée que le sol est argileux. Autrement dit, le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

Figure A-1.
Modification immédiate
du comportement
d'un sol argileux
humide provoquée
par l'introduction
de chaux vive.

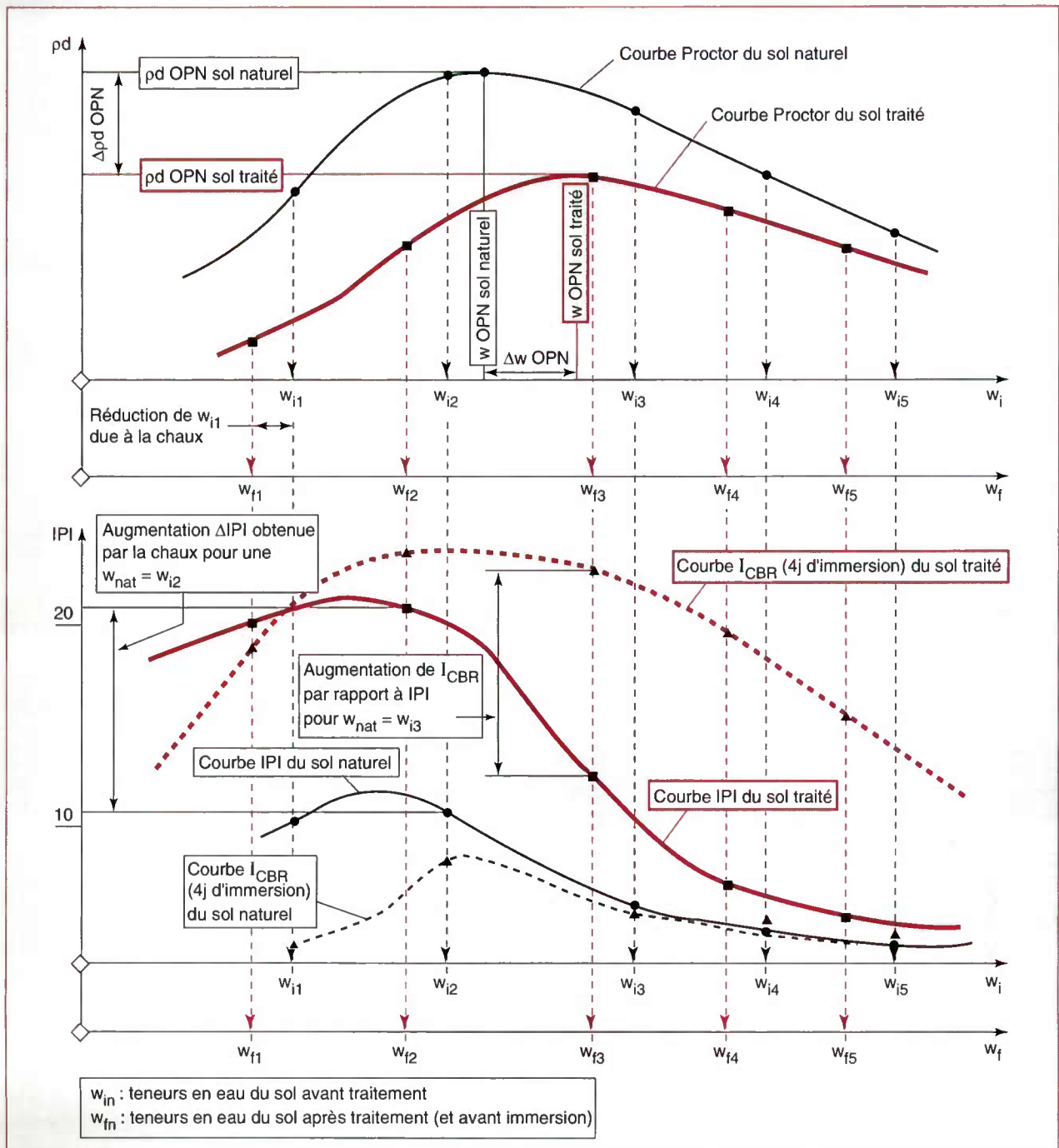
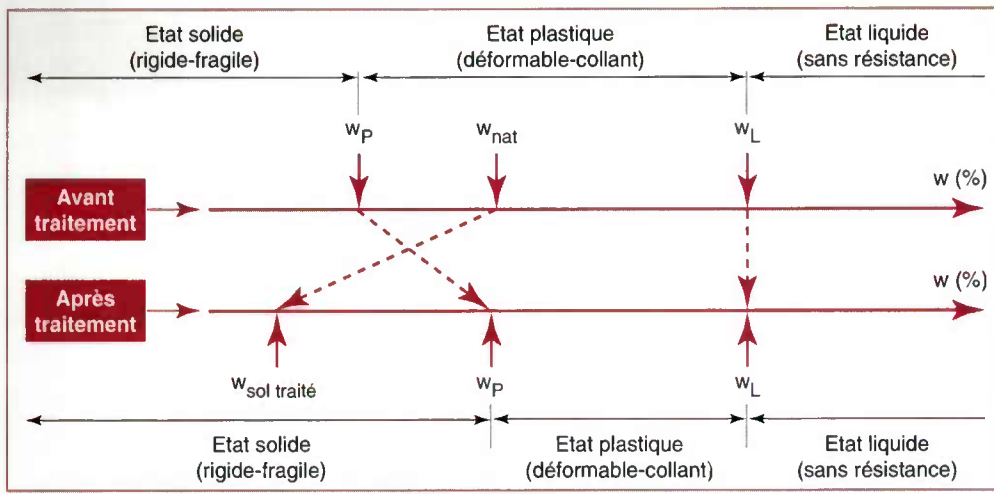


Figure A-2.
Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2 % de chaux vive.

Remarque. Contrairement à ce qui sera indiqué ci-après pour les actions à long terme, l'expérience actuelle a montré que la température n'avait pas d'influence sensible sur les actions immédiates. Ce paramètre n'a donc pas lieu d'être pris en compte dans les applications du traitement à la chaux pour la réutilisation des sols trop humides ou pour la réduction de l'argilosité des sols argileux potentiellement gonflants (sauf, évidemment, le cas de sols gelés pour lesquels le traitement à la chaux n'a, en première analyse, aucune raison d'être envisagé).

● 2.1.2 Actions à long terme

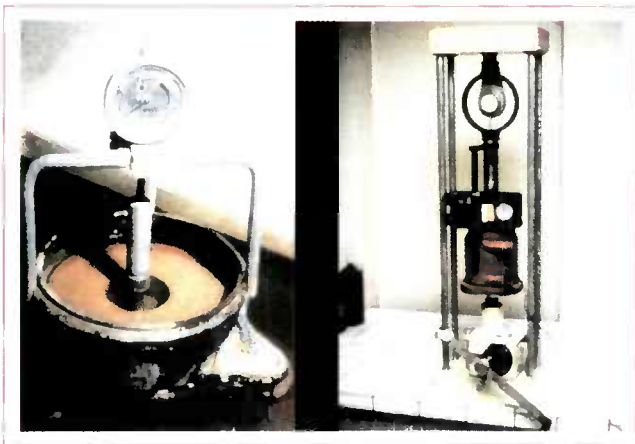
☛ a. Action pouzzolanique

Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol, lorsque leur proportion est significative (I_p mesurable ou $VB_S > 0,5$ grammes).

On rappelle que le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, en milieu de pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

La manifestation de cette action se traduit sur la figure A-2 par l'augmentation de l' I_{CBR} après 4 j d'immersion par rapport à l'IPI pour la teneur en eau du sol traité considérée. Son importance dépend, toutes choses égales par ailleurs, de cette teneur en eau.

Toutefois, les vitesses de solubilisation des constituants de la fraction argileuse d'un sol étant nettement plus faibles qu'en présence de matériaux pouzzolaniques traditionnels (laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, etc.), les phénomènes de cimentation se développent, en général, très lentement (plusieurs mois, voire des années, dans les conditions climatiques françaises moyennes).



*Essai de poinçonnement
(indice CBR et indice portant immédiat).*

Les facteurs intervenant dans la cinétique de la prise hydraulique des mélanges sol-chaux sont notamment :

☛ La température du milieu

Plusieurs études ont montré l'importance de ce facteur [11]. On peut retenir que les résistances atteintes au bout d'un an de conservation à 20 °C peuvent souvent déjà être obtenues en moins de 30 j, si la température est de l'ordre de 40 °C et qu'inversement, la prise s'arrête lorsque la température descend en dessous de 5 °C (elle reprend toutefois dès que la température s'élève à nouveau). La prise en compte de cet aspect est très importante dans le cas du traitement appliqué à la réalisation de couche de forme. En particulier, à défaut d'éléments justificatifs (étude spécifique, sols argileux très réactifs à la chaux, travaux terminés avant la fin

de l'été, etc.), il n'est pas conseillé de réaliser une couche de forme en sol traité à la chaux seule dans les régions pouvant être soumises à une période de gel significative.

☛ La quantité et la nature de la fraction argileuse présente dans le sol

Plus cette quantité est élevée et plus les édifices cristallins des minéraux argileux concernés sont altérés (smectites, montmorillonites), plus la mise en solution de la silice et de l'alumine est rapide et les cristallisations importantes (dans la mesure où les quantités de chaux et d'eau libre nécessaires sont disponibles).

Il faut toutefois signaler que certains sols, bien que définis comme argileux au sens géotechnique habituel (par la valeur de leur I_p ou de leur VB_S), ne donnent pas naissance à des réactions pouzzolaniques (argiles sériciteuses à forte teneur en mica provenant de l'altération des schistes, par exemple). C'est aussi le cas lorsque le sol renferme certains constituants (matières organiques, nitrates, sulfates, etc.) déjà évoqués au § A-1.1.1.

☐ L'état hydrique du sol

La présence dans le sol d'une quantité d'eau libre suffisante est indispensable pour assurer tout d'abord l'ionisation à pH élevé du milieu nécessaire à la solubilisation, puis l'hydratation de ces composés conduisant à la cimentation des particules granulaires. L'expérience a souvent montré que, sous les climats tempérés, les meilleures conditions de développement des réactions pouzzolaniques étaient observées lorsque l'état du sol avant traitement se trouvait au centre de la plage délimitant l'état « humide » (au sens défini dans la classification NF P 11-300).

Les valeurs des performances mécaniques escomptables à long terme des mélanges sol-chaux sont donc très variables d'un sol à un autre et difficilement évaluables avec précision au stade des études, en raison des délais nécessaires et des conditions d'exécution difficilement prévisibles à ce stade (saison des travaux, techniques et moyens de réalisation, etc.).

Par ailleurs, contrairement aux liants hydrauliques, il existe un dosage en chaux maximal (fonction de la quantité maximale de chaux « consommable » par l'argile présente dans le sol) au-delà duquel les performances mécaniques ne peuvent plus croître et risquent même de chuter du fait que la chaux non consommée renforce la sensibilité à l'eau du matériau.

Toutefois, sous les climats chauds et humides (tels que les climats tropicaux) et avec des matériaux suffisamment argileux, il est possible, par traitement à la chaux seule, de tirer profit des effets immédiats de la chaux (qui sont indispensables avec ces types de matériaux) et d'atteindre en quelques semaines des niveaux de performances mécaniques comparables à ceux obtenus avec des liants hydrauliques.

☛ b. Action de syntaxie

Cette action se produit avec les craies et les calcaires tendres saturés (ou proches de la saturation). Son principe peut être décrit simplement de la manière suivante [41] [42] [43] :

- la chaux vive, mélangée à des granulats de matériaux calcaires poreux humides, s'hydrate en provoquant simultanément un abaissement de la teneur en eau libre des granulats et la formation de chaux éteinte,
- la chaux éteinte, ayant une surface spécifique très élevée, peut se répartir à la surface de chaque granulats, à la manière d'une sorte de « pralinage »,
- l'abaissement de teneur en eau produit par l'extinction de la chaux vive et par l'évaporation provoque la précipitation, sous forme de calcite, des carbonates présents en solution saturée dans l'eau libre du granulats. Cette calcite obture les pores des grains augmentant ainsi leur résistance,
- le maintien du milieu à un pH élevé, du fait de la chaux de pralinage en excès, garantit l'insolubilité des bouchons de calcite ainsi formés et donc la pérennité de la résistance des grains,
- la chaux de pralinage en se recarbonatant sous l'action du gaz carbonique forme une sorte de prise « aérienne » qui agglomère durablement les granulats dans la partie superficielle de la couche en contact avec l'atmosphère (ce dernier aspect est, cependant, négligeable dans l'application au traitement des sols pour remblai ou couche de forme).

L'action de syntaxie explique, en particulier, l'intérêt du traitement à la chaux vive des craies humides en vue de leur utilisation en remblai et en PST. Par ailleurs, comme les actions immédiates, elle ne semble pas être significativement influencée par la température du milieu (du moins sous les climats français).

■ 2.2. Action des liants hydrauliques

Comme pour la chaux aérienne, on peut distinguer également des actions immédiates et des actions à long terme, mais, avec ces produits, ce sont principalement les modifications à moyen et long terme qui sont recherchées.

● 2.2.1. Actions immédiates

☞ a. Modifications de l'état hydrique

Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol qui subit un assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation du liant. Cet assèchement qui, selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5 % de teneur en eau par pour-cent de liant, ne prend cependant pas en compte, comme déjà indiqué pour la chaux au § A-1.2.1., l'évaporation plus ou moins importante pouvant se produire au cours du malaxage sur le chantier.

☞ b. Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Avec certains liants spéciaux routiers comportant une forte proportion de chaux (vive ou éteinte), il faut également inclure dans les modifications immédiates la floculation des minéraux argileux, comme cela a été décrit pour la chaux (mais sans être ni aussi rapide, ni aussi intense).

● 2.2.2. Actions à moyen et long terme

Elles résultent de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement. La valeur de cette résistance peut être choisie dans un domaine extrêmement large en fonction principalement du liant hydraulique et du dosage retenus.

On peut considérer, en simplifiant, que la prise hydraulique se développe en trois étapes. La durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

☐ La **première étape** est celle du **démarrage de la prise** (également dénommée : phase dormante). Elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps qui correspond au « délai de maniabilité » peut varier entre 2 et 24, voire 48 h après fabrication du mélange. Ce délai est très important dans les opérations de traitement de sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.

☐ La **deuxième étape** correspond au **développement de la cristallisation du gel** et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise hydraulique proprement dite. Elle s'étend de quelques jours pour les liants à forte proportion de clinker (ciments de type CPA-CEM I, par exemple) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.

Enfin, une fois la prise terminée, c'est-à-dire après formation de la quasi-totalité des ferro-silico-aluminates hydratés, il y a une période dite de **durcissement** qui correspond à la **troisième étape** durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s'échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois.

En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue.

On peut considérer, comme pour la prise d'origine pouzzolanique, que la prise des liants hydrauliques s'interrompt dès que la température du mélange descend en dessous de 5 °C, toutefois, étant donné que, pour la plupart de ces liants, la cinétique de prise est beaucoup plus rapide, les sujétions pratiques d'origine climatique sont évidemment moins contraignantes que dans le cas de la chaux. Il convient, néanmoins, de prendre cet aspect en considération, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance du sol traité à l'âge correspondant à l'apparition probable du gel sur un chantier donné (cf. § C1-3.6.). D'un point de vue pratique, lorsque le risque de gel est significatif, il est conseillé de n'engager le traitement de sol pour couche de forme qu'avec des liants hydrauliques dont la cinétique de prise est connue et d'autant plus rapide que les travaux se déroulent en arrière-saison.

La particularité essentielle des liants hydrauliques étant, comme indiqué plus haut, de pouvoir, en jouant sur le liant et le dosage, fabriquer des matériaux dont le niveau de performances (défini généralement par une résistance en traction et un module ^①) correspond au dimensionnement retenu pour l'ouvrage envisagé, il faut tout d'abord rechercher le type de liant adapté à la nature du sol à traiter et aux sujétions de mise en œuvre du chantier et, ensuite, déterminer la valeur du dosage de ce liant à mélanger avec le sol.

Pour ce qui concerne les ciments courants, le tableau A-I traduit l'expérience actuelle de l'adéquation de ces produits avec différents sols désignés conformément à la classification NF P 11-300 ^②.

Quant aux liants spécifiques routiers, les connaissances actuelles ne sont pas encore suffisantes pour considérer l'adaptation d'un liant à un type de sol donné acquise *a priori*. Avec ces produits, une étude spécifique de confirmation est donc, en principe, toujours nécessaire.

TABLEAU A-I
Adéquation des ciments courants avec différents types de sols

Types de sols	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III CLK-CEM III CLC-CEM V
Sols pas ou peu argileux (Classes A1, B1 à B5, D1)	* (1)	*	*
Sols argileux prétraités à la chaux (Classes A2, A3, B6)	* (1)	*	◇
Sols calcaires et marno-calcaires (Classes R2)	* (1)	*	*
Craies (Classes R1)	* (1)	◇	◇
* <i>Adapté a priori.</i>			
* (1) <i>Adapté a priori mais, en l'absence de retardateur de prise, leur usage est à privilégier pour les travaux en arrière-saison (en raison du faible délai de maniabilité de ces liants).</i>			
◇ <i>Adaptation à confirmer par une étude spécifique.</i>			

^① Dans le cas où l'emploi de liants hydrauliques est envisagé pour réutiliser en remblai des sols sensibles à l'eau trop humides (cas des sols fins peu plastiques et, éventuellement, des craies, cf. partie B-1.), le niveau de performances recherché s'appuie alors, comme avec la chaux, sur des valeurs de l'IPI.

^② La présence éventuelle de constituants chimiques particuliers tels que définis au § A-1.1.1c. n'est cependant pas prise en compte dans ce tableau.

Pour ce qui concerne la nature du matériau et ses conditions de mise en œuvre, il faut savoir que :

- plus le sol est argileux, moins en général les résistances sont élevées, compte tenu de la faible proportion d'éléments grenus constituant l'édifice granulaire. En particulier, il n'est pas judicieux d'envisager *a priori* un traitement des sols des classes A2 et A3, avec un liant hydraulique seul. Toutefois, des liants dégageant une importante quantité de chaux au cours de la prise (cas du ciment CPA-CEM I, par exemple) ou de liants comportant une forte proportion de chaux ou de clinker peuvent, dans certains cas, s'avérer efficaces sur ces matériaux, car leur prise hydraulique est renforcée par une prise de type pouzzolanique (de la chaux sur les argiles). En fait, la meilleure solution pour ces sols sera souvent de combiner les actions complémentaires de la chaux et du liant hydraulique en réalisant un « traitement mixte » ;
- la présence de constituants, tels que matières organiques, phosphates, nitrates, sulfates, sulfures, etc., induit des risques de réduction voire d'annulation des résistances par absence de prise ou destruction de prise par gonflements ettringitiques (*cf.* § A-1.1.1.c.) ;
- plus la masse volumique apparente sèche obtenue après mise en œuvre est élevée, plus la résistance est importante (quelques pour-cent de compacité supplémentaires conduisent, toutes choses égales par ailleurs, à quelques dizaines de pour-cent d'augmentation des résistances). Ceci revient à dire que les matériaux les plus intéressants sont les matériaux permettant les édifices granulaires les plus denses (granularité continue et étalée) et dont la fraction fine se trouve dans un état légèrement « humide » permettant de conserver après traitement un état hydrique « moyen à humide ». En revanche, si le sol traité se trouve dans un état hydrique « sec » et si l'épaisseur de la couche dépasse 0,25 m, l'obtention d'une compacité élevée en fond de couche, comme cela est exigé pour une couche de forme, devient pratiquement impossible, même avec les compacteurs les plus puissants ;
- la transposition au chantier des performances obtenues à l'étude suppose l'obtention d'un mélange dont la qualité se rapproche significativement de celle réalisée en laboratoire. Ceci peut conduire à refuser *a priori* certains modes de fabrication (malaxage à la charrue pour la réalisation de couche de forme de grands chantiers, par exemple).

3. Méthodologie générale des études de traitement des sols

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 et économiques.

■ 3.1. Progressivité des études

Les études de traitement des sols doivent être organisées selon un programme préétabli en vue de répondre aux questions spécifiques qui se posent au stade de l'étude considéré.

Ce programme se réfère à trois niveaux d'étude comme indiqué dans le tableau A-II. Les niveaux 0, 1 et 2 définissent les études couramment engagées successivement aux stades : de « l'étude préliminaire », de « l'avant-projet » et du « projet d'exécution ».

Le niveau 3 concerne, quant à lui, des études spécifiques, souvent lourdes, qui s'imposent lorsque les connaissances disponibles ou les études réalisées aux niveaux inférieurs n'ont pas apporté de réponses satisfaisantes sur des points jugés capitaux dans l'étude du projet (faisabilité du traitement, niveau de performances mécaniques accessible, justification de prescriptions techniques particulières, etc.).

Pour certains chantiers, il n'est donc pas exclu de devoir engager ces études spécifiques dès la phase la plus en amont de l'étude du projet.

TABLEAU A-II
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-1-2.3.2.)	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

❶ Cette convention a été retenue par homogénéité avec la pratique en vigueur dans le traitement des assises de chaussées ; elle diffère de celle adoptée jusqu'alors pour les applications du traitement en remblai et en couche de forme qui définissait le dosage comme étant le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de produit de traitement et de la seule masse du sol sec.

■ 3.2. Études géotechniques

Elles comportent deux volets [19] :

- la qualification des matériaux destinés à être traités,
- la formulation des mélanges à réaliser pour une application donnée.

La méthodologie à suivre est propre à l'application recherchée (cf. § B-1.3., B-2.3. et C-I), mais elle présente cependant des aspects généraux rappelés ci-après.

● 3.2.1. L'étude de qualification des matériaux à traiter

Elle comprend :

- l'identification des matériaux à partir des paramètres reconnus significatifs vis-à-vis du traitement (cf. § A-1.1.),
- leur localisation dans le profil géotechnique,
- l'estimation de leurs quantités.

Elle s'appuie, en premier lieu, sur les résultats de l'étude de reconnaissance générale, mais, le plus souvent, cette dernière doit être complétée pour préciser les réponses aux questions spécifiques au traitement, à savoir :

- le matériau est-il apte au traitement envisagé (granularité, état hydrique, teneurs en éléments perturbateurs, etc.) ?
- comment définir l'échantillon représentatif qui sera soumis à l'étude de formulation (prélèvements localisés ou mélanges de plusieurs prélèvements) ?
- quels sont, à partir de l'identification du matériau et de l'application envisagée, le (ou les) produit(s) de traitement adapté(s) et l'ordre de grandeur des dosages à prévoir ?

La complexité des études de qualification des matériaux croît rapidement en fonction de la variabilité du contexte géologique caractérisant les terrains concernés et du type d'application visée, mais le succès de la technique dépend, en grande partie, de la qualité de cette étude. C'est pourquoi il est recommandé qu'elle soit réalisée par un géotechnicien ayant une expérience approfondie des formations locales.

● 3.2.2. L'étude de formulation

Son objet est de préciser la nature du produit de traitement le mieux adapté et le dosage à introduire dans le sol pour obtenir les performances recherchées pour l'application visée.

On rappelle que le dosage en produit de traitement s'exprime en pourcentage de la masse de produit de traitement rapportée à la somme des masses de produits secs en présence dans le mélange, selon la relation ❶ :

$$d \% = \frac{Q}{M_{Ss} + Q + m_{Cg}} \times 100$$

dans laquelle

- Q est la masse de produit de traitement,
- M_{Ss} est la masse de sol sec ou éventuellement prétraité (à la chaux, par exemple),
- m_{Cg} est la masse du correcteur granulométrique, le cas échéant.

L'étude de formulation est réalisée sur le (ou les) échantillon(s) représentatifs constitué(s) à l'issue de « l'étude de qualification » et en choisissant un produit normalisé et certifié adapté au cas de chantier considéré. Une étude de formulation réalisée avec un liant spécial routier peut cependant être envisagée complémentairement si, à ce stade, on dispose déjà d'éléments permettant de prévoir avec une forte probabilité l'emploi du liant spécial routier en question.

Une étude de formulation comprend généralement (*cf.* § B-1.3., B-2.3. et partie C1) :

❑ L'identification du (ou des) produit(s) de traitement utilisé(s)

Une bonne connaissance des produits de traitement utilisés, pour chaque étude de formulation, est en effet nécessaire pour disposer de références permettant de comparer et d'interpréter les réactions et les résultats obtenus avec les différents matériaux et les principaux produits de traitement.

– *Dans le cas des ciments*, qui sont des produits normalisés et certifiés, on pourra en général se référer à l'identification du produit annoncée par le producteur.

– *Pour la chaux*, il faut connaître la teneur en chaux libre complétée par la courbe de réactivité dans le cas de la chaux vive.

– *Pour les liants spéciaux routiers*, il convient de vérifier les valeurs annoncées sur la fiche technique du produit et, en particulier, les performances mécaniques.

Les échantillons de produits de traitement utilisés pour les études de formulation doivent être conservés dans des récipients étanches, entreposés dans un local fermé, à une température supérieure à 10 °C et renouvelés tous les quatre à six mois.

❑ La vérification de l'aptitude du sol à être traité avec le produit envisagé

à partir de l'essai décrit dans la norme NF P 94-100. Toutefois, cette vérification peut ne pas être systématique dans l'application du traitement à la réutilisation en remblai de sols trop humides (*cf.* § B-1.3.1.b.).

❑ La détermination des dosages en produit de traitement à incorporer au sol

en fonction des performances recherchées et, éventuellement, des types de liant retenus et des fluctuations prévisibles de l'état hydrique du sol et de sa compacité.

● 3.2.3. Les planches d'essai et les chantiers expérimentaux

Ces études qui relèvent du niveau 3 indiqué dans le tableau A-II sont à engager principalement dans le cas de grands chantiers, lorsque l'état des connaissances et les résultats des études de niveau inférieur laissent encore subsister des incertitudes techniques, économiques ou environnementales déterminantes pour décider du choix de la solution « traitement » ou pour évaluer son coût avec la précision requise.

Parmi ces incertitudes, il peut y avoir notamment :

❑ La faisabilité du malaxage

types et nombre d'engins, modalités d'utilisation particulières, techniques nouvelles, organisation de chantier à prévoir, qualité du résultat obtenu, etc.

❑ La confirmation des performances mécaniques annoncées

par l'étude de formulation et prises comme hypothèses dans la conception des couches de forme et le dimensionnement de la structure (valeurs des résistances en fond de couche, par exemple).

❑ Certains problèmes techniques

comme le passage du matériau dans les dispositifs de dosage et de malaxage des centrales, la vérification de l'efficacité d'une technique de préparation des sols (homogénéisation, humidification, épierrage, etc.), la formation du feuilletage au compactage, l'optimisation de la méthode de réglage fin et de celle du type de protection superficielle, etc.



Chantier expérimental engagé au stade de l'étude d'un grand projet autoroutier.

❑ **Certaines contraintes particulières de chantier** telles que :

- une très forte sensibilité de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement,
- la possibilité, ou mieux l'intérêt, dans le cas d'un traitement mixte, de différer largement le prétraitement à la chaux du traitement au liant hydraulique,
- etc.

L'exécution d'un chantier expérimental constitue souvent une charge, financière importante, pour les budgets d'études habituels, il convient donc de ne l'engager qu'au terme d'une réflexion ayant en particulier pris en compte les aspects suivants :

❑ **Une définition claire des objectifs recherchés et de leur importance relative**

en particulier lorsque le chantier expérimental est décidé également pour rechercher d'autres informations indépendantes du traitement (difficultés d'extraction, possibilité de drainage par rabattement ou mise en dépôt provisoire, dimensionnement d'une couche de forme soumise à des sollicitations exceptionnelles, etc.).

❑ **Le choix du site où l'on réalisera le chantier**

L'aspect déterminant dans ce choix est la représentativité du site par rapport à l'ensemble du projet et aux réponses cherchées. Si cette condition n'est pas remplie, il est préférable de renoncer. Les autres aspects à considérer sont éventuellement les facilités d'acquisition de l'emprise, la possibilité d'intégrer ultérieurement le chantier expérimental dans l'ensemble du projet, les facilités d'accès, etc.

❑ **Les modalités particulières du marché à établir**

Il faut que le marché du chantier expérimental soit rédigé de manière à laisser au responsable de l'étude une large initiative sur le choix des matériels et sur les modalités de leur utilisation au vu des constatations et conclusions dégagées au fur et à mesure de son déroulement. Pour ce faire, il sera souvent avantageux de passer un marché « en régie ».

❑ **Les moyens en personnel et matériel à réunir**

pour analyser, interpréter les mesures et les constatations et établir la synthèse du chantier. Il est difficilement acceptable en effet, eu égard au coût relatif des moyens engagés, de devoir se priver d'informations objectives importantes faute d'avoir pu réunir, au moment du chantier expérimental, le personnel (en nombre et en compétence) ou les moyens de mesures et d'essais nécessaires.

En dépit des sujétions relativement lourdes pouvant apparaître lors de la conception et de la réalisation de tels chantiers expérimentaux, il faut reconnaître que ce type d'action a toujours été à l'origine d'avancées déterminantes dans la connaissance des possibilités de la technique et de son développement.

■ 3.3. Études économiques

La décision de recourir au traitement de sol doit être justifiée par une étude économique prenant en compte un maximum d'aspects et, notamment, ceux induits par les contraintes de protection de l'environnement [3]. Le présent guide se limite à présenter quelques uns des aspects les plus généraux.

● 3.3.1. Traitement de sols appliqué à la réutilisation en remblai de sols sensibles à l'eau trop humides

Les conditions générales conduisant à envisager le traitement sont indiquées ci-après.

1. - Les matériaux disponibles pour la construction des remblais sont en majorité des sols sensibles à l'eau qui se trouveront très probablement dans un état humide (voire très humide) au moment des travaux et il n'existe pas de possibilités évidentes de substitution à partir de matériaux d'emprunt ou de modification de la géométrie du profil.
2. - On pourra, au moment voulu, disposer sur le chantier des quantités de produit de traitement (chaux vive, en général) nécessaires, quantités pouvant atteindre plusieurs centaines de tonnes par jour dans le cas de chantiers de type autoroutiers.
3. - Le climat normalement prévisible durant les travaux est principalement froid et/ou humide.
4. - Le délai de réalisation est impératif.

Remarque. Les conditions 1. et 2. sont de toute évidence impératives. En revanche, si l'une ou l'autre des conditions 3. ou 4. n'est pas satisfaite, l'intérêt de la technique, bien que sensiblement diminué, peut encore rester suffisant pour décider son application, mais si aucune des deux n'est réunie, le traitement perd généralement son intérêt.

Pour comparer les coûts d'une solution « traitement » à ceux d'une solution « emprunt », il faut analyser les coûts élémentaires recensés dans le tableau A-III.

TABLEAU A-III
Coûts élémentaires entrant dans la comparaison entre solutions alternatives « traitement » ou « emprunt »

Composantes du coût de la solution « traitement »	Composantes du coût de la solution « emprunt »
Coût de fourniture du produit de traitement	Coût du dépôt : acquisition d'emprise ou droit de forage, extraction-chargement du déblai, transport au lieu de dépôt, piste de chantier éventuelle, régalage et compactage du matériau mis en dépôt, etc.
Coût spécifique du traitement : stockage, épandage, malaxage	Coût de l'emprunt : acquisition d'emprise ou droit de forage, extraction-chargement du matériau d'emprunt, transport sur le remblai, piste de chantier éventuelle, etc.
Coût d'extraction, chargement, transport	
Coût de la mise en remblai : régalage, compactage, etc.	Coût de la mise en remblai : régalage, compactage, etc.
	Coût du réaménagement du dépôt et de l'emprunt suivant les dispositions particulières du projet
Coûts induits indirects (nuisances spécifiques, assurance de la qualité (cf. A-3.3.3., etc.) dans la mesure où l'on dispose d'éléments objectifs pour les évaluer	Coûts induits indirects (nuisances spécifiques, assurance de la qualité (cf. A-3.3.3., etc.) dans la mesure où l'on dispose d'éléments objectifs pour les évaluer

À partir d'une connaissance statistique représentative localement des coûts élémentaires recensés dans le tableau A-III, il est possible de calculer les coûts au mètre cube de matériau mis en remblai pour chacune des deux solutions. On peut ainsi en déduire la distance maximale à laquelle doivent se situer les lieux de dépôt et d'emprunt pour que la solution « emprunt » reste économiquement préférable à la solution « traitement », compte tenu des quantités de chaux nécessaires prévues par l'étude. Inversement, si l'on dispose des lieux d'emprunt et de dépôt, on en déduit les valeurs des dosages en chaux maximaux qui rendraient la solution « traitement » plus économique.

L'annexe 4 propose, à titre indicatif, une démarche graphique permettant de répondre approximativement mais rapidement à ces questions.

Une forte probabilité de devoir utiliser en remblai des sols sensibles à l'eau en période humide et l'assurance de disposer le moment venu des importantes quantités de chaux vive nécessaires sont deux conditions déterminantes dans la décision de recourir au traitement



● 3.3.2. Traitement de sols appliqué à la réalisation de couches de forme

Dans cette application, la technique s'adresse à une variété de natures et d'états de sols beaucoup plus large que dans le cas de la réalisation de remblai. En effet, son intérêt est, non seulement, de pouvoir utiliser en couche de forme des matériaux qui, dans leur état naturel, n'ont pas les caractéristiques requises, mais également d'élever très sensiblement les caractéristiques des matériaux aptes à l'emploi en couche de forme sans traitement, afin de réduire les épaisseurs et donc les quantités (cf. GTR).

Pour la construction d'une couche de forme, le traitement constitue donc une éventualité qu'il convient d'envisager quasi systématiquement.

Les conditions pouvant limiter l'intérêt économique de la technique sont :

- la disponibilité à bon marché de matériaux possédant les qualités requises pour une couche de forme sans nécessiter de traitement,

- l'absence ou l'insuffisance d'études géotechniques permettant de garantir la qualité et la quantité de matériaux utilisables et le niveau des performances mécaniques prises en compte dans le dimensionnement,
- une forte probabilité que les travaux se déroulent durant une période où l'état hydrique des mélanges ne puisse être maîtrisé avec la précision exigée,
- l'absence de garanties suffisantes sur la qualité de l'exécution (technologie et état des matériels, expérience des équipes, moyens de contrôle insuffisants, etc.),
- etc.

Une analyse comparative des coûts entre des solutions de couche de forme en matériaux traités et non traités peut être conduite, dans ses grandes lignes, suivant une démarche analogue à celle évoquée pour les remblais (*cf.* annexe 4), en y apportant les adaptations suivantes :

- il est judicieux de comparer les solutions en concurrence sur la base de leur coût au mètre carré de plate-forme support de chaussée (voire de chaussée), ce qui permet de prendre en compte les gains éventuels sur les dimensionnements de la structure ;
- en plus du coût des opérations systématiques (stockage, épandage, malaxage, compactage, pré-réglage, réglage fin, protection superficielle, etc.), il faut inclure, dans le coût du traitement, celui des opérations complémentaires éventuellement nécessaires sur certains sols pour atteindre le niveau de qualité souhaité, telles que l'homogénéisation par dépôt-reprise, l'humidification, l'épierrage, le compactage spécifique, le cloutage, etc. ;
- il ne faut pas non plus négliger le coût des actions d'assurance de la qualité car la complexité de la réalisation des couches de forme traitées exige, en général, un coût de contrôle très sensiblement supérieur à celui nécessaire sur des couches de forme en matériaux granulaires (*cf.* § C2-2.4.).

● 3.3.3. Limites des études économiques

Au stade de l'étude du projet, il n'est pas réaliste de penser que l'évaluation du coût global du traitement puisse être très précise pour différentes raisons.

Il y a, tout d'abord, le nombre et la qualité des données statistiques utilisables pour évaluer les coûts élémentaires des différentes composantes des solutions « traitement ». Si l'on peut admettre que les données disponibles actuelles sont satisfaisantes pour l'application du traitement à la réutilisation en remblai des sols trop humides, ce n'est pas encore le cas pour ce qui concerne le traitement appliqué à la réalisation des couches de forme (notamment pour les opérations complémentaires éventuellement nécessaires sur certains sols : homogénéisation, humidification, épierrage, etc.).

Mais, il y a surtout, dans le cas de la réutilisation en remblai des sols trop humides, l'incertitude sur les quantités de matériaux à traiter et de produit de traitement à utiliser. Celles-ci dépendent de la finesse des études de reconnaissance géotechnique et de la pertinence des hypothèses faites sur les conditions météorologiques probables durant la réalisation du chantier.

Dans le cas de l'application du traitement à la réalisation des couches de forme, outre la méconnaissance des coûts relatifs à l'homogénéisation, humidification, etc. déjà évoquée, le nombre de passes de malaxage nécessaires pour obtenir la mouture recherchée, les endommagements des machines de malaxage par des éléments blocailleux non éliminés, l'usure plus ou moins rapide des outils, les quantités d'eau éventuellement nécessaires à l'humidification, etc. sont également des éléments aléatoires pouvant affecter considérablement la précision de l'estimation du coût du traitement.

Enfin, une comparaison économique rigoureuse entre solutions « avec » ou « sans » traitement devrait pouvoir prendre en compte les coûts indirects évoqués dans le tableau A-III tels que :

- le gain apporté par une réduction (ou, pour le moins, par le respect) des délais de chantier lorsque les conditions météorologiques sont défavorables (cas du traitement appliqué aux remblais),
- la fatigue d'une voirie utilisée pour écouler le trafic de chantier induit par l'exploitation d'un emprunt ou d'un dépôt),
- les nuisances diverses éventuelles spécifiques à chaque solution (émissions de poussières de produit de traitement, bruit, danger induit par le trafic de desserte d'un emprunt ou d'un dépôt, etc.),
- les coûts de l'assurance de la qualité,
- etc.

4. matériels de traitement des sols

Suivant les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou partie des matériels suivants [2] :

- matériels de stockage des produits de traitement,
- matériels d'épandage,
- matériels de préparation des sols,
- matériels de malaxage des sols en place,
- matériels d'arrosage,
- centrales de fabrication,
- matériels de compactage,
- matériels de réglage et de protection superficielle.

■ 4.1. Matériels de stockage des produits de traitement

Dans la pratique française actuelle, les produits de traitement utilisés se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac. Exceptionnellement, l'utilisation de chaux ou de ciment, conditionné en sacs de 40 ou 50 kg palettisés, peut être envisagée dans le cas de petits chantiers (inférieurs à 2 000 m², en général). Leur stockage doit alors être réalisé à l'abri des eaux pluviales et de ruissellement.

Dans les autres cas, le stockage, dans des silos, des produits de traitement livrés en vrac s'impose pour les deux raisons suivantes :

- nécessité de disposer d'une réserve suffisante de produit de traitement pour absorber les aléas normaux d'approvisionnement du chantier,



Silos mobiles de 2 X 20 t en cours de remplissage (à remarquer la poussière générée au cours de cette opération).



Silos mobiles de 2 X 45 t (à remarquer le manchon d'évacuation des poussières vers un filtre ainsi que la réserve d'eau prévue pour éliminer les produits de traitement lors d'un contact accidentel avec la peau).



Silos fixes de 100 t utilisés dans une centrale de fabrication de sable traité au ciment avec correction granulométrique.



Silo de 30 t constitué par la citerne d'un ensemble de transport routier (qui, après vidange, est reprise et remplacée par une citerne pleine).

➤ laisser aux produits de traitement, très souvent livrés chauds, un temps de repos permettant leur refroidissement et la neutralisation des charges d'électricité statique, conditions nécessaires à un écoulement stable (non fusant) permettant la réalisation d'un épandage précis.

Exceptionnellement, le stockage peut être évité dans certains contextes de chantiers répondant à des conditions d'organisation particulières, prévoyant, par exemple, une consommation de produit de traitement ajustée au débit de livraison. Dans ces cas, le transporteur peut livrer sur le chantier un conteneur plein et repartir avec un vide.

La terminologie relative aux matériels et dispositifs de stockage est définie dans la norme NF P 98-711.

Les aspects à considérer dans le choix et l'organisation du stockage des produits de traitement sont :

┌ La capacité de stockage

Il est souhaitable en général, notamment dans le cas des gros chantiers, de disposer d'une capacité de stockage correspondant à au moins un jour d'activité moyenne de l'atelier de traitement. Les silos habituels ont une capacité variant suivant les modèles entre 25 et 100 t. Dans le cas de traitement mixte, des silos réservés à chaque produit sont évidemment à prévoir.

┌ La qualité de conservation des produits stockés

Il faut que les silos conservent les produits de traitement à l'abri de l'eau et d'une ventilation permanente pour les protéger de l'hydratation et, dans le cas de la chaux, de la recarbonatation.

┌ La mobilité

Cet aspect concerne surtout le traitement en place réalisé sur des chantiers linéaires (routes, voies ferrées, etc.), pour lesquels il est impératif de réduire les distances de remplissage des épandeurs.



L'aménagement de la zone de stockage doit comporter la réalisation d'un accès facile et par tous les temps à des véhicules de transport routier.

┌ Le choix et l'aménagement de la zone de stockage

Les aspects suivants sont notamment à prendre en compte :

– *l'emplacement*. La zone de stockage constitue l'endroit le plus exposé aux émissions de poussières de produits de traitement (du fait des opérations de transvasement, des échappements des événements de purge, des risques de fausses manœuvres ou de ruptures dans les manchons de raccordement, etc.). Son emplacement doit être judicieusement choisi et résulter du meilleur compromis entre la proximité du lieu de traitement et de l'éloignement maximal des habitations, lieux d'élevage et de cultures fruitières et maraîchères. Il doit également tenir compte de la direction des vents dominants et des protections naturelles (zone boisée, topographie, etc.) ;

– *l'accessibilité*. La zone de stockage doit être accessible, quelles que soient les conditions météorologiques, par les véhicules porteurs qui sont des camions de type routier (un

essieu moteur). Il est donc nécessaire d'aménager un chemin d'accès adapté à ce type de véhicules (traficabilité, propreté, sécurité) ;

– *l'aménagement*. La surface doit être suffisante pour recevoir simultanément au moins un épandeur et un véhicule d'approvisionnement et permettre leurs manœuvres dans de bonnes conditions. Il convient également d'y aménager les installations telles que filtres secs ou humides pour raccordement aux événements de purge, réserve d'eau douce avec douchette, poste de pharmacie spécifique, etc. exigées par les consignes d'hygiène et de sécurité.

■ 4.2. Matériels d'épandage

Le traitement en place des sols se fait quasiment toujours à l'aide d'épandeurs alimentés avec des produits livrés en vrac. L'épandage « au sac » sur des plate-formes préalablement quadrillées, pour délimiter la surface correspondant à la masse de produit contenue dans un sac, est néanmoins acceptable au plan technique, mais ne peut s'envisager économiquement que sur des petits chantiers de géométrie complexe.

La terminologie relative aux matériels et dispositifs d'épandage est définie dans la norme NF P 98-712.

● 4.2.1. La quantité de produit à épandre

Elle est calculée d'après l'expression :

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

dans laquelle

- Q est la masse de produit à épandre (exprimée en kg/m²),
- d est le dosage recherché (exprimé en pourcentage de la masse de produit de traitement rapportée à la somme des masses de produits secs en présence, cf. § A-3.2.2.),
- e est l'épaisseur de la couche de sol en place sur laquelle se fera le malaxage (exprimée en mètre),
- ρ_d est la masse volumique apparente sèche du sol en place (le cas échéant, après avoir été prétraité à la chaux ou corrigé granulométriquement), estimée de visu en fonction de la nature et de l'état du sol, ou mesurée si nécessaire (exprimée en kg/m³).



L'épandage au sac est techniquement acceptable, mais économiquement ne peut se justifier que sur des surfaces exigües et de géométrie complexe.

● 4.2.2. Les engins d'épandage

Ils sont de plusieurs types [21] [28] [30] :

□ Les plus anciens (plus de vingt ans)

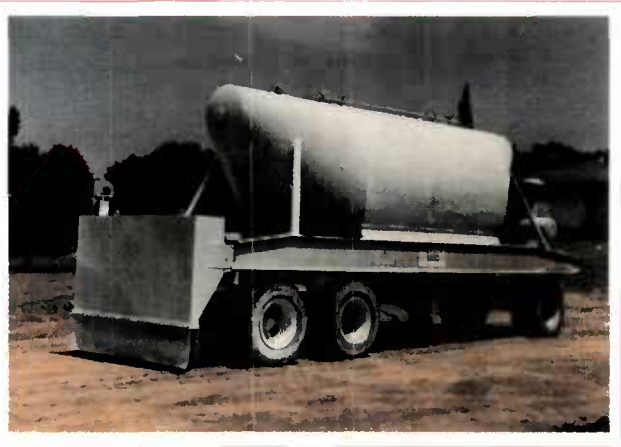
sont des engins à doseur volumétrique « horaire » (c'est-à-dire qu'ils délivrent, au moyen d'une trappe ou autre système comparable, une quantité de produit proportionnelle au temps). C'est le conducteur qui règle la masse épandue sur le sol en modifiant la vitesse de l'engin. Ils présentent l'intérêt de pouvoir épandre des masses de produit dans une gamme de valeurs aussi large que voulue (en jouant sur la vitesse d'avancement), ce qui peut s'avérer utile pour traiter des zones ponctuellement très humides, par exemple. Toutefois, en raison de leur faible précision, ces épandeurs ne devraient être admis que sur les chantiers pour lesquels le traitement ne représente qu'un enjeu secondaire ou lorsque le marché a prévu que l'entrepreneur proposerait un prix de matériau mis en œuvre, toutes sujétions comprises (cf. § B-1.6.1.).

□ Les épandeurs à doseurs volumétriques asservis à la vitesse de déplacement

Ce sont actuellement les engins les plus répandus. Leurs doseurs sont constitués généralement d'un tambour alvéolaire ou d'un tapis extracteur, dont le débit est asservi à la vitesse de l'engin, ce qui permet l'épandage d'une masse surfacique de produit indépendante de cette vitesse. Leur plage de débit, notamment pour les tambours alvéolaires, est assez limitée (dans un rapport de 1 à 5 en général), ce qui, dans le cas de traitement à fort dosage, présente l'inconvénient d'imposer la réalisation de l'épandage par superposition de plusieurs passes (cf. § A-4.2.3.).

Les engins d'épandage

Épandeur de première génération.
La variation de la masse épandue est obtenue en modifiant la vitesse de translation de l'engin.



Épandeur de deuxième génération à dosage volumétrique asservi à la vitesse de déplacement de l'engin.

Épandeur de troisième génération à dosage volumétrique asservi à la vitesse de translation et ajusté par un dispositif pondéral.

▣ **Les épandeurs à doseur volumétrique ajusté par un dispositif pondéral**

Ces engins apparus récemment [28] et [30] sont équipés, comme les précédents, d'un doseur volumétrique asservi à la vitesse de déplacement du porteur, mais ils sont complétés par un élément de pesée de la cuve de l'épandeur et de mesure du déplacement de l'engin. Cet équipement permet de réaliser un réglage précis et rapide (quelques minutes) du doseur volumétrique (avec production d'une trace écrite) et, de ce fait, réduit considérablement le coût du contrôle de l'épandage en même temps qu'il en améliore la fiabilité.

● **4.2.3. Précision de l'épandage**

La précision de l'épandage conditionne la fiabilité de la technique du traitement en place des sols, car il est démontré que le malaxage ne corrige pas les imprécisions d'épandage. La précision requise doit, par ailleurs, être d'autant plus grande que l'on vise des natures d'ouvrages plus sollicitées (couches de forme visant des plates-formes de classes 3 ou 4, en particulier).

La précision de l'épandage dépend ① :

▣ **De la conception du doseur : type et plage de débit**

Il est en effet fortement recommandé de pouvoir réaliser, en une seule passe, l'épandage de la totalité de la masse de produit imposée, ceci en raison des risques d'oubli d'une, voire de plusieurs passes (indépendamment des émissions de poussières générées par la circulation de l'épandeur sur une surface déjà recouverte de produit de traitement, cf. § A-5.3.).

① Une classification des épandeurs à partir des valeurs de leurs coefficients de variation longitudinal et transversal et de leur possibilité d'épandre en largeur variable est en passe d'être adoptée et pourra avantageusement être utilisée pour caractériser la classe d'un épandeur à utiliser sur un chantier donné [23].

❑ **De la présence sur l'engin d'accessoires d'aide à la conduite** tels que :

- un dispositif de largeur d'épandage variable (pour éviter les recouvrements de bandes lorsque la largeur de la plate-forme à traiter n'est pas un multiple entier de la largeur d'épandage de l'engin) ;
- une alarme avertissant de la proche vidange de la cuve et interrompant automatiquement et instantanément l'épandage du produit afin d'éviter les fins de bandes d'épandage en « biseau » ;
- un dispositif de repérage permettant au conducteur d'épandre commodément des bandes parallèles et « bord à bord », ou mieux avec un recouvrement de quelques centimètres pour superposer les talus de chaque bande (cf. § C2-2.2.) ;
- éventuellement, différents dispositifs de saisie et d'enregistrement des vitesses de déplacement de l'engin, du tambour alvéolaire ou du tapis extracteur, des séquences d'étalonnage, des masses de produit épandues, ceci afin de réduire et de fiabiliser les actions de contrôle de l'épandage.

❑ **Du bon état de fonctionnement de ce matériel**

qui doit faire l'objet d'un entretien spécifique intégré dans les procédures d'assurance de la qualité.

❑ **Des conditions de visibilité.**

❑ **De la dextérité du conducteur.**

La précision de l'épandage s'évalue à partir :

- de son coefficient de variation C_v qui s'exprime par la relation

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

avec

- s : écart-type déterminé sur une population de mesures de la masse par mètre carré estimée représentative de l'opération d'épandage analysée,
- m : moyenne de cette population ;
- de son exactitude qui s'exprime par l'écart entre la masse surfacique moyenne (constatée sur une population donnée) et la masse surfacique recherchée.

Une méthode opérationnelle de détermination de la précision d'un épandeur est décrite dans l'annexe 6.

● 4.2.4. Autres aspects à considérer

☛ a. La productivité de l'épandeur en liaison avec celle de l'atelier de malaxage

Pour cela, sont à considérer :

- la capacité de la cuve de l'épandeur,
- ses vitesses de déplacement (en épandage et en transfert),
- ses conditions de maniabilité et de traficabilité sur sols peu portants et mal nivelés,
- son temps de remplissage,
- la distance moyenne séparant le chantier à la zone de stockage,
- etc.

☛ b. Sa conception vis-à-vis de la génération de poussières

cf. annexe 5.

■ 4.3. Matériels de préparation des sols

Certains sols ou matériaux rocheux peuvent nécessiter une préparation avant de procéder à leur traitement, principalement pour les applications autres que la réutilisation en remblai de sols trop humides. Celle-ci peut nécessiter tout ou partie des opérations suivantes.

● 4.3.1. Une décohesion du matériau en place

Elle est destinée à faciliter l'action des engins de malaxage ou la pénétration de l'eau dans le cas où une humidification s'impose. Dans l'application à la réalisation des remblais, elle peut également s'avérer nécessaire pour des matériaux particuliers comme les craies peu denses, humides voire très humides (R12 et R13 dans les états « h » voire « th », cf. § B-1.5.4.).

Les engins adaptés sont des défonceuses multidentés (trois au minimum), appelés scarificateurs, décohesionneurs ou décompacteurs de sols, portés par des tracteurs ou des niveleuses. Leur profondeur d'action varie suivant les équipements entre 30 et 70 centimètres.

● 4.3.2. L'élimination des éléments blocailleux

Cette opération concerne essentiellement les applications du traitement en couche de forme qui exigent un malaxage dans une centrale ou à l'aide de pulvérisateurs de sols à arbre horizontal n'admettant pas de blocs dont le D_{\max} est supérieur ou égal à 100 mm en général. Dans le cas de l'application à la réutilisation en remblai des sols trop humides, c'est davantage la méthode de malaxage qui doit être adaptée à la granularité du matériau (cf. § B-1.5.).

Pour réaliser l'élimination des éléments grossiers, il existe plusieurs méthodes utilisant des techniques et des matériels variés, parmi lesquels on trouve :

□ L'élimination manuelle après scarification du matériau en place

Cette pratique est limitée aux petits chantiers pour lesquels la présence d'éléments grossiers est erratique.

□ Le criblage à l'aide de cribles de tous types

fixes, semi-mobiles, simples grilles montées sur les bennes des engins de transport, etc.

□ La scarification

permet de réaliser la remontée en surface des blocs puis leur regroupement et ramassage à l'aide d'engins de type agricole, tels que des andaineurs et ramasseurs de pierres (ces deux fonctions pouvant être groupées sur un même engin).

□ le concassage en place

à l'aide de concasseurs portés à l'arrière d'un tracteur : ces engins, issus du machinisme agricole également, sont efficaces dans les sols calcaires et gréseux tendres, relativement secs et dont les blocs ont été préalablement ramenés en surface par scarification et andainage. Leur intérêt est de ne pas diminuer les quantités de matériaux disponibles et de les enrichir par une fraction grenue à angle de frottement élevé.

D'une manière générale, l'efficacité de toutes ces méthodes décroît très vite avec l'humidité et la plasticité de la matrice argileuse présente dans le matériau. Un moyen de l'améliorer est de procéder à un prétraitement, même grossier, à la chaux vive.

Actuellement, il faut toutefois reconnaître que l'on n'est pas en mesure d'affirmer qu'il existe une solution technique et économique garantissant la réussite du traitement pour tous les types de sols comportant des blocs. Lorsque ce problème apparaît déterminant dans la faisabilité du traitement (cas qui concerne principalement les couches de forme), il est souvent justifié de réaliser un chantier expérimental avant la consultation des entreprises (cf. § A-3.2.3.).

● 4.3.3. Une homogénéisation de la nature des matériaux du gisement

Cette opération concerne quasi exclusivement l'application du traitement pour couche de forme. Elle s'effectue avec les matériels de terrassements habituels : pelles, chargeurs, décapeuses, etc. Sa réussite dépend, avant tout, de l'adéquation entre le type d'hétérogénéité que l'on veut corriger et la technique choisie : simple tri sélectif, méthode d'extraction adaptée au type d'hétérogénéité constatée, suivie éventuellement d'un dépôt provisoire et d'une reprise (cf. § C2-2.1.).

● 4.3.4. Une humidification pour changer d'état hydrique

L'humidification est à envisager avant tout pour la réalisation des couches de forme, mais peut s'imposer, dans certains cas, pour le traitement de certaines parties de remblai (cf. § B-2.). Elle peut exiger des quantités d'eau importantes, pouvant aller jusqu'à 7 à 10 % de la masse des matériaux traités (au-delà de ces valeurs, la solution traitement n'est généralement plus économique) et, par conséquent, il est nécessaire de disposer d'ateliers d'arrosage dimensionnés en conséquence. Il faut, par ailleurs, que la quantité d'eau nécessaire soit disponible, que son répandage soit contrôlé et que sa pénétration dans le sol soit homogène (en particulier, l'eau ne doit pas ruisseler dans les traces du véhicule et se concentrer dans les points bas du profil en long). Pour ce faire, il est généralement nécessaire de scarifier préalablement le sol, de répandre l'eau en plusieurs séquences et à l'aide de rampes d'aspersion déportées ou placées à l'avant de l'arroseuse (cf. § A- 4.5. et C2-2.1. et C2-2.6.).

■ 4.4. Matériels de malaxage des sols en place

Ils sont constitués principalement par deux familles d'engins :

- les malaxeurs à outils fixes, représentés par les charrues et, éventuellement, les engins à lame (niveleuses, boteurs équipés de lames traditionnelles ou de lames spécialement conçues pour cet usage, etc.) ;
- les malaxeurs à outils animés, représentés par les pulvérisateurs de sols (dénommés pulvi-mixers dans le passé) et les bêches mécaniques et, dans une certaine mesure, les décapeuses élévatrices (ou auto-chargeuses).

La terminologie relative aux matériels et dispositifs de malaxage est définie dans la norme NF P 98-712.

● 4.4.1. Les malaxeurs à outils fixes

☛ a. Les charrues

Elles sont soit à disques, soit à socs. Ces matériels sont bien adaptés au traitement appliqué à la réutilisation en remblai des sols trop humides.

☐ Les charrues à disques

comportent quasiment toujours deux rangées de disques, formant entre elles un angle réglable, dont dépend plus ou moins la profondeur d'action et la finesse de mouture du sol (l'optimisation de cet angle ne peut être étudiée que sur le chantier). Elles produisent un malaxage d'une qualité convenable pour des corps de remblai qui s'obtient en général avec deux à quatre passes, selon la plasticité et l'humidité du sol. Leur efficacité se limite aux matériaux dont le D_{\max} n'excède pas 250 mm (seuil retenu dans le GTR pour fixer la

Les charrues

⇒
*Charrue à disques de 5 t,
largeur de 2,5 m et profondeur
de malaxage d'environ 0,15 mètre.*



⇐
*Détail de l'action de malaxage produite
par une charrue à disques.*

⇒
*Charrue à quatre socs, largeur de 2 m,
profondeur de malaxage de 0,75 mètre.*



⇐
*Mouture obtenue à la première passe
par la charrue à quatre socs ci-dessus.*

limite pratique courante des matériaux pouvant être réutilisés en remblai lorsqu'il est nécessaire de les traiter). Un handicap important des charrues à disques réside dans la faible épaisseur de la couche pouvant être malaxée, soit 20 cm au maximum pour les plus grosses (diamètre des disques de l'ordre de 1 m et poids supérieur à 5 t). Elles peuvent, néanmoins, malaxer des quantités importantes (plusieurs milliers de m^3/j), à condition que leur tracteur soit puissant et rapide (plus de 200 kW et une vitesse de 4 à 8 km/h) et si plusieurs charrues sont attelées ensemble. Un deuxième handicap de ces charrues est leur faible maniabilité car elles sont quasiment toutes tractées (certains modèles sont, toutefois, relevables hydrauliquement sur un châssis à roues à pneumatiques qui améliore sensiblement leurs conditions de transfert sur chantier et leur mobilité).

❑ Les charrues à socs « version génie civil »

Ces charrues, apparues depuis quelques années, remédient aux insuffisances des charrues à disques. Leur profondeur de malaxage atteint en effet aisément 50 cm, et leur maniabilité devient celle du tracteur sur lequel elles sont portées. Autre avantage, la valeur limite du D_{max} des sols malaxables avec ce type de charrue peut être portée à 350 mm. En contrepartie, la qualité du malaxage obtenu à nombre de passes identique est sensiblement moins bonne en raison du nombre très inférieur de cisaillements du sol produits par les socs en une passe. En pratique, on considèrera qu'il faut au moins doubler le nombre de passes par rapport à ce qui serait nécessaire avec une charrue à disques (ce qui conduit en général à six à huit passes). Enfin, il faut être conscient qu'une profondeur de malaxage de l'ordre de 50 cm exigera presque toujours des tracteurs à chenilles de forte puissance (dépassant souvent 350 kW).

➤ b. Les engins à lame

Les engins à lame tels que boteurs et niveleuses peuvent, à défaut de charrues, être utilisés pour mélanger un produit de traitement avec des sols comportant une fraction grenue importante (classes B1 à B4 et D, principalement). Leur mode d'action et, par suite, la qualité de malaxage produite est comparable à ce que l'on obtient avec une charrue à socs, mais la productivité est forcément faible car cela revient à une charrue à soc unique. À signaler également que certaines lames spéciales constituées de dents ayant la forme de socs montées à la place de la lame classique d'un boteur de forte puissance ont été utilisées avec succès pour prétraiter à la chaux des graves argileuses humides telles que des moraines classées C1B4h (cf. § B-1.4.4.) [32].

● 4.4.2 Les malaxeurs à outils animés

➤ a. Les pulvérisateurs de sols à tambour (ou arbre) horizontal ①

Ces engins sont dérivés des « rotavators » agricoles, (certains de ceux-ci pouvant d'ailleurs être encore utilisés sur de petits chantiers). Ils sont constitués d'un tracteur comportant un tambour porte-outils dont l'axe est horizontal et perpendiculaire au sens de déplacement de l'engin. Le tambour est entraîné en rotation hydrauliquement ou mécaniquement puis, foncé dans le sol, à l'aide de vérins, jusqu'à la profondeur désirée. L'ensemble est coiffé d'un carter de manière à confiner le mélange durant la durée du malaxage, cette dernière étant directement liée à la vitesse de déplacement de l'engin. Actuellement, il existe environ une dizaine de modèles de ces pulvérisateurs de génie civil [27], mais, malgré leurs éventuelles similitudes morphologiques, on ne peut pas considérer que tous produisent des mélanges de même qualité (définie à la fois par la finesse de mouture obtenue à nombre de passes et matériau donnés, et par la maîtrise de l'épaisseur malaxée).

① Une classification des pulvérisateurs de sols à partir de l'homogénéité de malaxage dans l'épaisseur de la couche malaxée produite, de la maîtrise de l'épaisseur de la couche malaxée, de leur puissance et de la possibilité d'introduire un liquide dans la chambre de malaxage est en passe d'être adoptée et pourra avantageusement être utilisée pour caractériser la classe d'un pulvérisateur de sols à employer sur un chantier donné [23].

Les pulvérisateurs de sols



Pulvérisateur de sols de première génération à chambre de malaxage portée à l'arrière du tracteur, épaisseur maximale de la couche malaxée 0,3 m (après compactage).



Pulvérisateur de sols de deuxième génération à chambre de malaxage intercalée entre train avant et arrière, épaisseur maximale de la couche malaxée 0,35 m (après compactage).



Gros pulvérisateur de sols de troisième génération de 600 CV, épaisseur maximale de la couche malaxée 0,5 m (après compactage).

D'un point de vue général, on retiendra que :

➤ vis-à-vis de l'homogénéité du mélange, il a été montré, sur des sols granulaires, que la qualité du mélange produite avec ces matériels était comparable à celle obtenue dans les centrales, dans la mesure où l'épandage était réalisé avec précision. Cette comparaison n'a pu être faite avec des matériaux cohérents étant donné que les centrales ne sont pas en mesure d'accepter de tels matériaux, mais il est permis de penser que l'homogénéité des mélanges réalisés avec de tels sols est d'un niveau comparable à celui obtenu sur les sols granulaires (à précision d'épandage égale). C'est d'ailleurs la possibilité de réaliser avec ces matériels un excellent malaxage sur une grande variété de sols qui explique le développement considérable de la technique dans la réalisation des couches de forme ;

➤ vis-à-vis de l'épaisseur et de la régularité de la couche malaxée, les pulvérisateurs les plus performants sont les plus puissants et ceux dont la chambre de malaxage est placée entre les trains de roulement avant et arrière. La profondeur malaxée est maximale à la première passe, car, lors des passes suivantes, le foisonnement du sol provoque un relèvement du tambour porte-outils qui, par conséquent, occasionne une réduction sensible de l'épaisseur malaxée. Lorsque la profondeur de malaxage recherchée est voisine des possibilités maximales de la machine, un recomptage entre deux passes de malaxage peut donc s'avérer indispensable (cf. § C2-2.5.c.) ;

➤ vis-à-vis de la mouture, les paramètres favorisant la finesse de mouture sont :

- un sens de rotation du rotor inverse à celui des roues motrices,
- des valeurs élevées du rapport entre la vitesse de rotation du rotor et celle d'avancement de l'engin,
- le nombre d'outils (couteaux en L, bèches ou pics) par unité de longueur de génératrice du tambour et bien entendu l'état d'entretien de ces outils,
- la présence d'une barre de retenue et/ou de fractionnement disposée à l'arrière de la chambre de malaxage qui retarde l'éjection du mélange hors de la chambre de malaxage.

Toutefois, pour un engin, et un sol donnés, on peut admettre que la finesse de mouture n'est plus modifiée au-delà de trois à quatre passes (sauf à procéder à un compactage intermédiaire pour reconfiner le sol entre deux passes successives de malaxage).

Du point de vue de l'utilisation pratique de ces pulvérisateurs, il faut s'intéresser :

- à la profondeur maximale pouvant être malaxée (mesurée après compactage). Avec les pulvérisateurs de sols courants, elle est de 30 cm (considérée après compactage), mais, depuis 1995, des modèles plus puissants sont apparus permettant de malaxer des couches de 50 cm d'épaisseur. L'intérêt de ces derniers est d'élever la productivité de la fabrication du mélange, mais cette possibilité ne peut être mise à profit que dans le cas où le mélange est transporté à un lieu de mise en œuvre différent du lieu de fabrication (*cf.* § C2-1.), car le compactage d'une couche de 0,5 m d'épaisseur n'est généralement pas réalisable avec les compacteurs actuels,
- à la conception et au système de fixation des différents outils de coupe, eu égard à leur rapidité d'usure et d'interchangeabilité,
- aux limites d'emploi dans les sols très cohérents et surtout dans les sols blocailleux (dimension maximale des blocs pouvant être absorbée pour un type d'outil et une nature pétrographique donnés),
- au choix du type d'outils à adopter en fonction de la nature des sols à malaxer (pics pour des matériaux rocheux ou ayant déjà subi un traitement avec des liants hydrauliques, bèches pour la plus grande variété de sols, couteaux en L dans le cas de sols moyennement à très argileux ne comportant pas de blocs, etc., par exemple),
- à l'intérêt de certains dispositifs tels que : système d'injection d'eau (ou autre liquide) dans la chambre de malaxage, équipements anti-poussières divers, pressurisation de la cabine, dispositif de repérage de la profondeur malaxée, etc.

➤ b. Les rotobêches

Il s'agit d'engins produits par le machinisme agricole, mais choisis parmi les modèles les plus puissants et robustes. Leur principe d'action consiste à découper une motte de terre et à la projeter, ainsi que le produit de traitement préalablement répandu, sur une grille ou un bouclier pour pulvériser et mélanger l'ensemble. Ces engins comportent une série de bèches fixées sur un vilebrequin entraîné en rotation par la prise de force d'un tracteur d'une puissance supérieure à 100 kW. La profondeur d'action est fixée par l'excentricité du vilebrequin, elle est généralement de l'ordre de 25 à 35 cm. Les engins les plus puissants sont utilisables sur des sols dont le D_{\max} atteint 100 mm. La qualité du malaxage (mouture et régularité de l'épaisseur malaxée) est intermédiaire entre celle obtenue avec les charrues et les pulvérisateurs de sol. Elles sont, toutefois, mieux adaptées que ces deux types d'engins aux sols très cohérents humides (classes A3h et A4h, en particulier) et aux chantiers exigus (remblais techniques, élargissements de remblais ou de couche de forme, etc.).



Rotobêche. Largeur 3 m, épaisseur maximale de la couche malaxée 0,30 m (après compactage). Tracteur de 150 CV.

➤ c. Autres engins à outils animés

Des machines complexes permettant, en plus du malaxage, d'assurer d'autres fonctions (décohésionnement du matériau en place, dosage-épannage, humidification, réglage, etc.), sont utilisées sur des chantiers autoroutiers pour des couches de forme-fondation, ou pour le retraitement d'anciennes chaussées avec des liants hydrauliques. Sur la plupart de ces machines, la fonction malaxage reste réalisée par un tambour-fraiseur, dont le principe d'action est comparable à celui des pulvérisateurs de sol à arbre horizontal avec outils en forme de bèches (pour le malaxage de sols) ou de pics (retraitement d'anciennes chaussées) dont l'extrémité est constituée d'une pastille en carbure de tungstène.

À signaler également les décapeuses élévatrices ou autochargeuses, dont le système d'auto-chargement et déchargement produit un brassage du matériau qui peut être suffisant (ou sinon avantageusement complémentaire à une charrue) pour réaliser un mélange de qualité acceptable pour la réutilisation de sols trop humides en remblai (cf. § B-1.5.2.).

Il convient enfin de rappeler l'utilisation, dans le passé, d'engins agricoles légers tels que des pulvérisateurs à axe vertical ou des herse rotatives. Actuellement, ils ne sont plus utilisés, principalement en raison de leur mauvaise aptitude à maîtriser l'épaisseur malaxée et à répartir le produit de traitement dans l'épaisseur de la couche.

■ 4.5. Matériels d'arrosage

Ces matériels ne sont concernés que par les applications du traitement autres que la réutilisation en remblai des sols trop humides, mais, pour ces applications, leur action est souvent déterminante pour le succès de la technique.

Ils sont constitués par des engins de conception très variable, souvent issus du machinisme agricole ou fabriqués dans les ateliers des entreprises, mais qui, le plus souvent, ne permettent pas de réaliser la maîtrise des ajustements de l'état hydrique avec la précision souhaitable (ou du moins cohérente avec celle déjà atteinte par les épandeurs et les pulvérisateurs de sols).

La conception de ces engins doit être améliorée, en particulier sur les points suivants (cf. § A-4.3.4., C2-2.1. et C2-2.6.) :

- la maîtrise précise des quantités d'eau épandues,
- la suppression du ruissellement par la réalisation d'une scarification superficielle avant arrosage et/ou la conception des dispositifs d'aspersion adaptés.

Par ailleurs, il faut insister sur la nécessité, pour chaque chantier, de vérifier l'ajustement des moyens d'arrosage aux besoins prévisibles, car l'expérience a montré que l'importance de cette opération n'était souvent pas comprise et qu'elle avait tendance à être négligée du fait des lourdes contraintes de chantier qu'elle impose.

Les arroseuses affectées à l'entretien des pistes de chantier sont aussi celles utilisées pour le traitement des sols, mais, pour cette application, leur précision n'est pas suffisante.



⇒
Concentration de l'eau d'apport dans les traces du tracteur et concentration dans les points bas du profil en long.

■ 4.6. Centrales de fabrication

Ces matériels sont généralement ceux utilisés pour la fabrication des assises traitées aux liants hydrauliques [25] et [29], équipés, si le matériau contient une fraction fine significative, de certains dispositifs facilitant l'écoulement des matériaux dans les trémies de chargement, les doseurs et les chambres de malaxage (*cf.* § C2-2.4.).

■ 4.7. Matériels de compactage

Pour la construction des corps de remblais, les modalités de compactage des sols traités sont définies dans les tableaux du GTR.

Pour les autres applications des sols traités, et en particulier les couches de forme, les valeurs données dans le GTR peuvent, suivant les particularités des chantiers, être complétées par des exigences supplémentaires précisées au § C2-2.5.

■ 4.8. Matériels de réglage et de protection superficielle

Ces matériels sont spécifiques à l'application du traitement à la réalisation des couches de forme et, éventuellement, au traitement des arases de terrassement. Ils sont décrits dans les § C2-2.7. et C2-2.9.

5. Aspects généraux de l'assurance de la qualité des travaux de traitement des sols

■ 5.1. Rappels des principes de la démarche de l'assurance de la qualité

Comme pour les autres types de travaux réalisés dans le cadre d'un marché public, la démarche de l'assurance de la qualité relative au traitement des sols implique :

1. - la traduction, par le maître d'œuvre, de la qualité d'usage (définie par le maître d'ouvrage) en qualité requise (par l'intermédiaire des stipulations) ;
2. - la remise, par le soumissionnaire, d'une offre financière accompagnée d'un SOPAQ, document qui, d'une part, présente l'organisation générale des actions que l'entrepreneur prévoit de mettre en place pour assurer la qualité de la tâche et, d'autre part, apporte les

réponses au questionnaire éventuel figurant dans le DCE portant sur la manière dont le soumissionnaire prévoit de traiter certains aspects particuliers de la tâche et sur lesquels le prescripteur n'a pas souhaité imposer de stipulations dans le DCE. Les réponses données dans le SOPAQ engagent l'adjudicataire du marché ;

3. - l'établissement, par l'entrepreneur adjudicataire du marché, du PAQ du chantier. Ce document précise les actions visant l'obtention de la qualité que l'entrepreneur s'engage à réaliser (matériels utilisés, procédures d'exécution appliquées, moyens du contrôle intérieur, dispositions correctives prévues en cas d'anomalies d'exécution, organisation de la communication, etc.). Il doit être en cohérence avec les stipulations du marché et les éléments présentés par l'entrepreneur dans le SOPAQ. Il engage l'entrepreneur, mais peut être modifié en cours de chantier, en accord avec le maître d'œuvre ;

4. - l'établissement, par le maître d'œuvre, du SDQ du chantier. Ce document reprend les éléments du PAQ (et des PAQ des entrepreneurs sous-traitants éventuels), les coordonne et les complète par les actions d'assurance de la qualité que le maître d'œuvre entend réserver au contrôle extérieur. Ce document sert, d'une part, à l'entrepreneur dans la conduite de l'exécution (notamment, pour la prise en compte des points critiques et des points d'arrêt) et, d'autre part, au maître d'ouvrage, car il traduit la stratégie prévue par le maître d'œuvre pour assurer la qualité des travaux ;

5. - la vérification, en cours de chantier, du respect des stipulations du marché et des engagements formulés dans le SDQ ;

6. - Une synthèse générale des actions d'assurance de la qualité réalisées durant le chantier, en vue de la constitution du dossier de récolement.

L'application de ces concepts généraux aux différentes natures d'ouvrages concernées par le traitement des sols se traduit par des dispositions spécifiques qui sont présentées respectivement dans les § B-1.6. et 2.5 et la partie C3 du document.

■ 5.2. Pertinence des stipulations techniques

La qualité d'un ouvrage dépendant en premier lieu de celle des stipulations qui le définissent, il y a lieu, pour chaque marché, d'évaluer leur pertinence.

Les stipulations imposées sont-elles :

- techniquement fondées, c'est-à-dire significatives de la qualité d'usage recherchée ?
- nécessaires et suffisantes pour garantir l'obtention de la qualité d'usage visée ?
- vérifiables opérationnellement ?
- équitables dans les modalités répartissant, entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur, les risques résultant des aléas probables ?

Dans le cas des travaux de traitement des sols, les réponses à ces questions sont souvent délicates, comme le montrent les développements consacrés aux stipulations dans les parties B et C du document. Des propositions de stipulations concernant l'application du traitement pour la réutilisation en remblai de sols trop humides et pour la réalisation de couches de forme sont par ailleurs présentées dans les annexes 8 et 9.

■ 5.3. Protection de l'environnement vis-à-vis des poussières de chaux ou de liants hydrauliques

Les traitements de sols peuvent causer des nuisances engendrées par les poussières de chaux et/ou de liants hydrauliques émises durant les travaux [4] [20] [37].

Le tableau A-IV présente les principales sources d'émission de poussières de produits de traitement généralement constatées sur les chantiers et différentes solutions pouvant être proposées pour les réduire, voire les neutraliser.

Une partie plus ou moins importante des éléments se rapportant aux solutions proposées dans le tableau A-IV sont à prendre en compte dans les stipulations des marchés de traitement de sols en fonction du niveau de sensibilité à l'environnement présenté par le chantier considéré.

Il est par ailleurs proposé, en annexe 5, les règles pratiques qu'il convient, dès à présent, d'appliquer dans ce domaine.

Remarque. Une action au niveau de la fabrication des produits de traitement permettant de réduire significativement leur capacité d'envol constitue une mesure particulièrement efficace qui complète très avantageusement les dispositions proposées dans le tableau A-IV. (ou même supprime en grande partie la nécessité de certaines d'entre elles). Cette mesure est actuellement opérationnelle pour certaines chaux vives et il est souhaitable qu'elle soit progressivement appliquée à l'ensemble des produits de traitement des sols considérés dans le document.

❶ Les éléments présentés dans ce paragraphe ont été proposés respectivement par :

- la Chambre syndicale des fabricants de chaux grasse et magnésienne (cf. annexe 1) ;
- le Syndicat de l'industrie cimentière (cf. annexe 2).

Ils sont extraits des fiches de sécurité conformes à la directive CEN 91/155.

■ 5.4. Sécurité des personnes ❶

● 5.4.1. Identification des risques

Les chaux, les ciments et la plupart des liants hydrauliques sont des produits utilisés de longue date (depuis l'Antiquité pour la chaux et plusieurs décennies pour la plupart des liants hydrauliques). Leurs composants de base sont issus de matériaux naturels courants (calcaire, silice alumine, oxyde de fer, gypse, etc.).

Néanmoins, ils présentent un caractère basique vis-à-vis duquel les personnes en contact avec ces produits doivent être protégées [37], car l'alcalinité de ces produits peut en effet :

- dessécher la peau en cas de contact prolongé,
- irriter les voies respiratoires supérieures en cas d'inhalation,
- irriter voire provoquer des lésions oculaires en cas de projection,
- provoquer éventuellement des réactions allergiques en cas de contacts répétés ou prolongés.

Toutefois, pour ce qui concerne notamment les chaux aériennes, aucune maladie professionnelle liée à l'utilisation de ces produits n'a encore été identifiée.

● 5.4.2. Mesures de prévention

Elles ont pour objet de prévenir les risques évoqués ci-dessus en réduisant au maximum les possibilités de contact des produits avec la peau, les voies respiratoires et surtout les yeux.

TABLEAU A-IV
Principales sources d'émissions de poussières de produits de traitement et propositions de solutions

Phase d'exécution	Matériel ou installation en cause	Sources d'émission de poussières	Solutions pouvant être proposées
Transport Stockage	Porteurs	Amas de produit laissés sur le porteur à la fin du remplissage	Passage de chaque porteur dans une installation de dépoussiérage avant départ de l'usine (*)
		Purge de la citerne	Aménagement de zones spécialement équipées pour cette pratique (qui ne doit être qu'exceptionnelle (**)) Sanctions diverses à prévoir et à appliquer pour les cas où des purges seraient faites en dehors de ces zones (*)
	Silos	Rejets de produit par les événements du silo durant le remplissage	Raccordement des événements des silos à des filtres en bon état (*)
		Excès de remplissage du silo	Mise en place sur les silos d'un dispositif de contrôle du remplissage et d'alerte en fin d'opération (*)
Organes de transvasement	Fuites aux raccords et/ou éclatement des manchons	Application d'une procédure d'entretien spécifique pour maintenir en parfait état tous les organes de transvasement et tout particulièrement des manchons et de leurs systèmes de verrouillage (*)	
Aire de stockage	Accumulation de produit par suite de pertes ou fuites accidentelles	Élimination de toute accumulation de produit par tout moyen <i>ad hoc</i> (*)	
Épandage	Épandeurs	Rejets de produit par les événements de l'épandeur durant le remplissage Excès de remplissage de l'épandeur Fuites aux raccords et/ou éclatement des manchons	Solutions identiques au cas du transvasement porteur-silo
		Hauteur de chute du produit trop importante	réduction de la hauteur de chute du produit (limitée à 0,5 m maximum) (***) Canalisation du produit durant sa chute par des jupes souples en bon état jusqu'à 5 à 10 cm du sol (**) Installation sur l'engin d'une rampe de brumisation-en périphérie du dispositif d'épandage (**)
		Défaut d'étanchéité notamment en fin de vidange dans le cas d'épandeur à fluidisation ou à éjection pneumatique	Revoir l'intérêt d'une mise en fluidisation du produit de traitement dans la cuve de l'épandeur et, dans l'affirmative, prévoir un dispositif d'alerte, en approche de fin de vidange, commandant instantanément l'arrêt de répandage (***) Réalisation d'une bonne étanchéité d'ensemble de l'épandeur et plus particulièrement au niveau de l'obturateur (*)
		Passage de l'épandeur sur une surface déjà recouverte par le produit de traitement	Épandre en une seule passe la totalité de la masse de produit requise (*)
		Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement	Réaliser des carénages et une orientation des canalisations d'échappement <i>ad hoc</i> (***) Épandeur réalisant simultanément épandage et malaxage du produit avec le sol (***)

Phase d'exécution	Matériel ou installation en cause	Sources d'émission de poussières	Solutions pouvant être proposées
Malaxage	Charrues et autres engins de malaxage à outils fixes tractés	Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement du tracteur	Idem cas des épandeurs
		Turbulences provoquées par les patins des chenilles ou les disques des charrues	Adapter les vitesses de travail des engins de traction aux conditions atmosphériques (vent) (★)
	Pulvérisateurs de sols à arbre horizontal	Turbulences dues aux souffleries des moteurs et aux rejets des gaz d'échappement	Idem cas des épandeurs
		Mauvais réglage de l'ouverture des trappes de la chambre de malaxage	Corriger le réglage et l'adapter à la nature et l'état du sol et former le conducteur (★)
Conditions météorologiques et organisation du chantier	Vent	Présence de vent provoquant la formation et l'entraînement de poussières	Arrêt du traitement et surtout de l'épandage dès que l'entraînement des poussières dépasse les limites acceptables pour le chantier considéré (★)
	Tous engins	Circulation d'engins (y compris voitures légères) sur une surface recouverte de produit	Interdire par tous moyens <i>ad hoc</i> toute circulation sur une surface recouverte (★)
	Coordination des ateliers	Surface recouverte de produit	Réaliser une coordination entre les ateliers d'épandage et de malaxage de telle sorte que le délai entre épandage et malaxage n'excède jamais 30 minutes (★)

* Solution évidente devant être considérée comme constituant une règle de l'art dont l'application s'impose

** Proposition ayant une forte probabilité de constituer une solution (notamment parce qu'elle a déjà été validée sur certains matériels récents), mais qui demande encore quelques mises au point technologiques

*** Propositions dont la validité reste à démontrer ou dont la prise en compte ne peut être envisagée que dans le cadre de l'étude de nouveaux matériels

Sources d'émissions de poussières de produits de traitement

Stockage

L'aire de stockage est la zone la plus exposée à la pollution par les produits de traitement. Dans ce cas, un bosquet situé à l'arrière-plan limitera la dissémination des poussières générées par les opérations de transvasement.



Lors du transvasement pneumatique des produits de traitement, les orifices de purge du silo et de l'épandeur doivent être raccordés à des systèmes filtrants



Filtre sec constitué d'une fosse recouverte d'un géotextile non tissé.



Filtre humide constitué d'une fosse remplie d'eau périodiquement renouvelée.

Épandage



L'épandage peut constituer une opération génératrice de poussières, lorsque la hauteur de chute des produits est importante et en présence de vent.



Les produits de traitement épandus, lorsqu'ils sont encore chauds, ont un comportement fusant qui ne permet pas une bonne précision d'épandage et génère beaucoup de poussières.

Quelques constatations



L'œil ainsi que la caméra peuvent être de mauvais capteurs pour juger de la production de poussières. Ici, il ne s'agit nullement de poussières de chaux vive, mais simplement de vapeur d'eau produite par l'extinction de la chaux vive.



Lorsque le matériel est en bon état et en l'absence de vent, le traitement en place peut être réalisé sans atteinte à l'environnement et sans danger.

① Le port d'un masque respiratoire peut être facultatif lorsque les malaxeurs et les épandeurs sont pourvus d'une cabine pressurisée en bon état.

Pour cela, les personnes présentes soit sur le lieu de stockage des produits (conducteurs de camions de livraison et des épandeurs, agents de contrôle de la qualité des produits, etc.), soit sur le lieu de traitement (conducteurs d'épandeurs, de pulvérisateurs de sols y compris ceux des tracteurs de charrues, agents de contrôle de la qualité de l'exécution, chefs d'équipe, topographes, etc.), doivent disposer d'un équipement vestimentaire comportant :

- une combinaison à jambes et manches longues fermant jusqu'à la base du cou,
- des gants en matière insensible à l'alcalinité,
- des lunettes,
- des chaussures de sécurité,
- un masque respiratoire anti-poussières éventuellement ①.

Par ailleurs, l'expérience ayant montré que la quasi-totalité des accidents se sont produits lors des séquences de transvasement (du porteur dans le silo ou du silo dans l'épandeur), il importe que tous les organes concernés dans cette opération, et tout particulièrement les manchons souples et leurs embouts de raccordement, soient maintenus en parfait état et contrôlés méthodiquement selon la procédure définie dans le PAQ (au minimum un examen visuel journalier avec trace écrite).

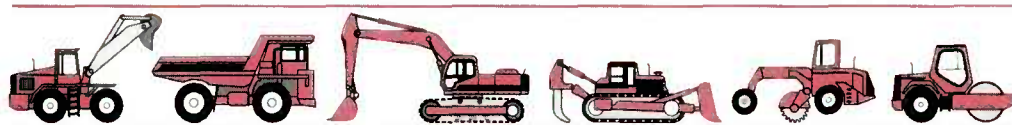
● 5.4.3. Premiers secours

En cas de contact avec la peau, rincer les parties concernées à l'eau courante.

En cas de projection dans les yeux, rincer abondamment avec de l'eau propre durant 1 à 15 min. S'il s'agit de chaux vive, consulter un médecin dans les meilleurs délais.

En cas de réactions allergiques, utiliser des crèmes de protection ou un traitement adapté.

Pour être en mesure de porter ces premiers secours, il y a lieu de prévoir, en un endroit connu de toutes les personnes concernées, un poste de soins d'urgence comportant une douchette reliée à une réserve d'au moins 50 l d'eau potable ainsi qu'une trousse à pharmacie contenant : pommades anti-allergiques, compresse(s) de gaze, serviette(s), miroir et éventuellement un collyre. À défaut d'endroits mieux appropriés, on choisira la zone de stockage.





Traitement des sols en remblais

Traitement des sols appliqué à la réutilisation
des sols trop humides

Autres applications du traitement des sols
dans la construction des remblais

Résumé

Le traitement des sols appliqué à la réalisation des remblais a principalement pour objet de permettre la réutilisation de sols sensibles à l'eau se trouvant, au moment de leur extraction, dans un état trop humide pour pouvoir être mis en œuvre dans des conditions techniques et économiques acceptables.

Le recours au traitement peut aussi être envisagé pour réaliser certaines parties de remblai, nécessitant des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des corps de remblais courants. Ce peut être le cas, notamment, pour la « partie supérieure des terrassements » (PST), les zones de remblai d'accès difficile, la partie inférieure des hauts remblais construits avec des matériaux sensibles à l'eau ou évolutifs ou en zone inondable, les talus des remblais à forte pente, etc.

■ **Les particularités du traitement dans son application à la réutilisation des sols trop humides** sont les suivantes :

- le **produit de traitement le mieux adapté** est le plus souvent la chaux aérienne calcique vive ;
- le paramètre retenu au stade de l'étude pour décider de la nécessité de traiter et des dosages à prévoir est l'**indice portant immédiat (IPI)** du sol à sa teneur en eau probable au moment de l'exécution ;
- la décision de procéder à un traitement des sols a le plus souvent une incidence importante sur l'économie du chantier, étant donné les quantités de matériaux entrant en jeu, les coûts des produits et des opérations de traitement. Cet aspect impose des **études géotechniques et économiques** détaillées pour reconnaître la nature, l'état, la localisation et les quantités des différentes formations nécessitant un traitement et pour comparer les coûts des solutions alternatives. Pour certains chantiers, ces études sont à engager dès la phase débouchant sur l'évaluation financière du projet ;
- les **matériels spécifiques** nécessaires sont principalement :
 - des silos de stockage dont la capacité doit être accordée au débit du chantier,
 - des épandeurs à doseur volumétrique asservis à la vitesse d'avancement,
 - des engins de malaxage constitués principalement par des charrues à disques ou à socs ;
- la **technique d'exécution** habituelle est celle du traitement « en place ». Elle consiste à épandre le produit de traitement, dans le déblai ou sur le remblai, puis à le malaxer avec le sol. Des modalités de mélange différentes peuvent, cependant, se révéler plus pertinentes avec des matériaux particuliers tels que les craies ou les matériaux blocailleux ;
- l'**assurance de la qualité** de cette tâche vise principalement à optimiser la consommation de produits de traitement. Cet aspect doit être pris en compte, tout d'abord, dans la formulation des stipulations, de manière à établir une répartition équitable des conséquences financières résultant des aléas portant sur les quantités de matériaux à traiter et de produit de traitement à utiliser. Ensuite, durant la phase d'exécution, différentes actions d'assurance de la qualité sont à réaliser afin de vérifier, d'une part, la conformité des ateliers de traitement (nombre, nature, état de fonctionnement des engins) avec les engagements pris et, d'autre part, le respect des modalités assurant l'optimisation de la consommation du produit de traitement recherchée. Enfin, il convient d'être vigilant vis-à-vis du respect des règles pratiques en matière de protection des personnes et de l'environnement.

■ **Le traitement des sols appliqué à la réalisation de parties de remblai particulières** nécessite une analyse spécifique des objectifs visés. Chacune de ces applications requiert en effet des performances, des méthodes d'étude, des stipulations, une gestion de l'assurance de la qualité et, le cas échéant, des matériels et des techniques d'exécution qui lui sont propres. La seconde partie de ce chapitre développe les principaux éléments relatifs à ces aspects.

Sommaire

1. Traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides **61**

■ 1.1. Contexte général	61
■ 1.2. Performances à rechercher	63
■ 1.3. Études à réaliser	63
• 1.3.1. Étude géotechnique	63
• 1.3.2. Étude économique	66
■ 1.4. Matériels d'exécution	68
• 1.4.1. Matériels de stockage des produits de traitement	68
• 1.4.2. Engins d'épandage	68
• 1.4.3. Engins de préparation des sols	68
• 1.4.4. Engins de malaxage	68
• 1.4.5. Engins de compactage	70
■ 1.5. Techniques d'exécution	70
• 1.5.1. Technique courante	70
• 1.5.2. Mélange par la technique dite du « dépôt-reprise »	70
• 1.5.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai	72
• 1.5.4. Technique de malaxage spécifique à la craie humide peu ou moyennement dense	72
■ 1.6. Assurance de la qualité	73
• 1.6.1. Formulation des stipulations	73
• 1.6.2. Contrôle de l'exécution du traitement	76
• 1.6.3. Synthèse des actions d'assurance de la qualité	81

2. Autres applications du traitement des sols dans la construction des remblais **82**

■ 2.1. Objectifs du traitement	82
• 2.1.1. Amélioration de la portance de la partie supérieure des terrassements (PST)	82
• 2.1.2. Remblaiement des zones d'accès difficile	82
• 2.1.3. Réalisation des parties basses des hauts remblais construits avec des sols sensibles à l'eau ou avec certains matériaux rocheux évolutifs pouvant se trouver temporairement inondés	82
• 2.1.4. Raidissement des pentes de talus de remblai	84

■ 2.2. Performances à rechercher	84
■ 2.3. Études à réaliser	85
• 2.3.1. Identification et qualification des matériaux à traiter	85
• 2.3.2. Étude de formulation	85
• 2.3.3. Identification du produit de traitement	85
■ 2.4. Matériels et techniques d'exécution	86
• 2.4.1. Amélioration de la partie supérieure des terrassements (PST)	86
• 2.4.2. Remblaiement des zones d'accès difficile	86
• 2.4.3. Réalisation des parties basses des hauts remblais construits avec des matériaux sensibles à l'eau ou rocheux évolutifs	86
• 2.4.4. Raidissement des pentes de talus de remblai	86
■ 2.5. Assurance de la qualité	87
• 2.5.1. Formulation des stipulations	87
• 2.5.2. Actions de contrôle	87

Dans la construction des remblais routiers, le traitement des sols est appliqué principalement pour pouvoir utiliser des sols sensibles à l'eau se trouvant, au moment de l'exécution des travaux, dans un état humide (voire très humide) qui ne permettrait pas leur mise en œuvre avec les techniques de terrassement habituelles dans des conditions considérées comme acceptables dans le contexte technique et économique actuel.

Il peut être aussi nécessaire de recourir au traitement pour élever de manière suffisante et définitive les caractéristiques mécaniques des sols appelés à constituer certaines parties de remblai délicates telles que : partie supérieure des terrassements (PST), partie inférieure des hauts remblais, remblais techniques, remblais à forte pente de talus, etc.

1. Traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides

■ 1.1. Contexte général

L'utilisation en remblai de sols sensibles à l'eau trop humides présente différents risques :

- **au plan technique.** Des instabilités résultant soit de tassements de consolidation, soit de ruptures par cisaillement, consécutives à la création de pressions interstitielles en cours de mise en œuvre et/ou à des pentes de talus inadaptées aux caractéristiques mécaniques du sol dans cet état. Ces problèmes d'instabilité doivent être étudiés avec les outils de la mécanique des sols ;
- **au plan économique.** Des coûts de mise en œuvre anormalement élevés et des délais d'exécution allongés du fait des difficultés de circulation des engins sur ces matériaux.

Vis-à-vis de ce contexte, il faut retenir les points suivants.

➤ Le traitement a pour principal objectif de permettre la mise en œuvre des remblais

En effet, l'expérience française des deux dernières décennies a montré que les conditions limites de circulation acceptables économiquement pour les engins de transport (qui peuvent se définir schématiquement par l'apparition d'ornières de plus de 10 à 15 cm) étaient atteintes, en général, avant que les risques d'instabilité cités précédemment n'apparaissent véritablement (sauf, éventuellement, dans le cas des remblais de grande hauteur réalisés avec des sols argileux humides, peu perméables).

Partant de cette constatation, il apparaît que le dosage optimal est celui qui permet d'assurer une traficabilité suffisante pour réaliser le chantier et qu'au-delà de cette valeur il y a « surconsommation » de produit de traitement entraînant un surcoût généralement injusti-

fié. En effet, le supplément de stabilité à l'ouvrage conféré par une prise hydraulique ou pouzzolanique éventuelle n'est, en général, pas utile dans cette application et la rigidification à long terme qui en résulte peut même ne pas être souhaitable dans certains cas (remblais construits sur des sols potentiellement déformables ou instables, par exemple).

Dans la construction des remblais, le traitement a généralement pour principal objectif de permettre la mise en œuvre



Conditions limites de circulation sur des graves limoneuses B₃h (profondeur d'ornière de plus de 0,2 mètre).



Conditions impossibles de circulation sur une craie R₁₃h (immobilisation des engins).

➡ Le produit de traitement le mieux adapté est le plus souvent la chaux aérienne calcique vive

C'est en effet avec ce produit qu'à dosage donné, on obtient l'amélioration la plus importante et la plus immédiate du comportement du sol, principalement par l'action concomitante de la floculation de la fraction argileuse et de la réduction de la teneur en eau par hydratation de la chaux vive. En effet, lors du malaxage par conditions évaporantes, la floculation rend possible une plus fine pulvérisation du sol favorisant au maximum les échanges entre les particules de sol et l'air ambiant (cf. § A-2.1.).

La chaux vive est également bien adaptée à la réutilisation des craies trop humides en raison aussi bien de la réduction de la teneur en eau que du phénomène de syntaxie qui, sur ces matériaux, pérennise l'amélioration de la résistance au cisaillement produite par l'assèchement (cf. § A-2.1.).

Des liants hydrauliques à prise relativement rapide voire des ciments (notamment des CPA) peuvent aussi être utilisés pour des matériaux sensibles à l'eau peu ou pas argileux comme les craies (classes R₁₂, R₁₃, etc.), mais aussi des sols graveleux et sableux (classes B₂, B₄, B₅, etc.).

On peut également chercher à réduire la teneur en eau des sols trop humides en les mélangeant à des matériaux fins secs ou très secs tels que des sables fins ou des cendres volantes, mais cette technique, qui requiert des conditions de chantier très particulières, n'est pas développée ici. On retiendra toutefois que la démarche d'ensemble, et en particulier l'esprit de la méthodologie de formulation, décrite plus loin, peut s'appliquer aussi à ce type de traitement.

➡ La décision d'engager le traitement a presque toujours une incidence forte sur l'économie d'un chantier

En effet, ceci résulte des quantités généralement mises en jeu et du coût des produits de traitement.

De ce fait, l'objectif de consommation optimale de chaux est à considérer dès l'élaboration du projet.

En pratique, cela impose pour chaque nouveau projet :

➤ l'exécution d'une étude géotechnique et météorologique spécifique qui doit être engagée au plus tard au stade d'étude aboutissant à l'évaluation financière du projet (stade de l'avant-projet en général),

- la formulation dans le contrat de stipulations claires, répartissant équitablement entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur les risques financiers liés aux aléas géotechniques et météorologiques,
- l'application, lors du chantier, de procédures d'assurance de la qualité permettant de garantir le respect des stipulations du contrat.

❶ Les valeurs à rechercher sur le sol traité ainsi que celles conduisant à l'arrêt du traitement ou à sa poursuite avec réduction du dosage sont données dans le tableau B-I par une fourchette qui tient compte de l'argilosité plus ou moins importante des sols entrant dans le regroupement des classes GTR considéré, les valeurs basses correspondant alors aux sols du regroupement dont l'argilosité est la plus élevée.

■ 1.2. Performances à rechercher

Pour caractériser quantitativement, au stade de l'étude d'un projet, les conditions définissant un sol fin humide, on se réfère principalement à l'indice portant immédiat (IPI) du sol mesuré à sa teneur en eau naturelle sur une éprouvette compactée à l'énergie « Proctor Normal » (cf. GTR).

Les valeurs de l'IPI en deçà desquelles le traitement :

- peut s'avérer nécessaire,
- doit être interrompu ou poursuivi avec réduction du dosage,

ainsi que les valeurs à viser dans l'étude de formulation (cf. § B-1.3.1.b.), sont indiquées dans le tableau B-I ❶.

TABLEAU B-I
Objectifs du traitement des sols appliqué à la réutilisation des sols trop humides en remblai

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)						R ₁₂ ❶	R ₁₃ ❶	F ₂
	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁ *	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ * C ₁ B ₅ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃ *	B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ *	B ₂ B ₅ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ * C ₁ B ₅ C ₂ B ₅ *				
Valeurs en dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf. GTR)	8	5	3	15	12	15	10	15	
Valeurs à obtenir sur le matériau traité ❖	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	

* 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.)

❶ 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

❖ 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.)

■ 1.3. Études à réaliser

● 1.3.1. Étude géotechnique

Pour apporter les réponses aux questions se posant à un stade donné d'élaboration du projet, il faut engager des niveaux d'études dont le contenu est en grande partie celui indiqué dans les tableaux A-II et B-II.

TABLEAU B-II
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	<p>Collecte des données documentaires disponibles (cartes géologiques, fichiers d'éléments géotechniques et météorologiques, dossiers d'étude de chantiers comparables, etc.)</p> <p>Recueil de l'expertise locale</p> <p>Analyse et synthèse de ces éléments dans la perspective du traitement de sol appliqué au projet envisagé</p>	<p>Appréciation de la nécessité du traitement et de son importance relative pour l'opération envisagée</p> <p>Mise en évidence de difficultés anormales éventuelles pouvant mettre en cause la faisabilité du traitement sur le chantier considéré</p>	Étude préliminaire
1	<p>Interprétation, dans la perspective du traitement, des éléments acquis dans le cadre de la reconnaissance géologique et géotechnique générale du tracé</p> <p>Si nécessaire, exécution de quelques sondages complémentaires (tarière, pelle, etc.) pour identification plus fine des principales formations concernées</p> <p>Exécution d'une étude de formulation sommaire sur la (éventuellement les deux ou trois) famille(s) de sols la (les) plus représentative(s)</p> <p>Établissement d'une synthèse de l'ensemble de ces éléments</p>	<p>Évaluation des volumes probables de sols à traiter et des techniques et matériels d'exécution utilisables</p> <p>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)</p>	Avant-projet
2	<p>Compléments de reconnaissances géotechniques en vue de l'identification de l'ensemble des formations de sols concernées par le traitement</p> <p>Pour chaque formation distinguée, constitution d'échantillons représentatifs (du sol moyen et des sols extrêmes)</p> <p>Exécution des mesures permettant d'évaluer la plage des états hydriques probables de chaque formation au moment de la réalisation du chantier</p> <p>Identification, si nécessaire, du produit de traitement utilisé dans l'étude</p> <p>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)</p>	<p>Qualification de l'ensemble des sols devant être traités</p> <p>Établissement des règles régissant les dosages à appliquer en fonction de la nature et de l'état des sols</p> <p>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</p>	Projet
3	<p>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.)</p> <p>Organisation et conduite d'un chantier expérimental de traitement, par exemple, dans le cas de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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 A₄, matériaux rocheux évolutifs, etc.) - etc. 	<p>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</p>	<p>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 *</p>

* 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

Ainsi, au terme de l'avant-projet, il est nécessaire d'avoir mené les études permettant d'annoncer, avec la précision requise pour un prédimensionnement technique et financier, les volumes de sol à traiter ainsi que les quantités de produits de traitement nécessaires. Ces études doivent ensuite être précisées pour qu'au terme du projet soumis à l'appel d'offres, une localisation sur le profil en long (et si nécessaire en travers) des sols nécessitant un traitement selon des techniques d'exécution similaires ainsi que les quantités de produit probables puisse être fournie dans le DCE [5] [19].

☛ a. L'étude de reconnaissance et de qualification des sols

Elle a pour objet de délimiter le zonage des différentes formations de sols nécessitant un traitement pour être réutilisés dans les remblais. La distinction entre ces formations doit toutefois pouvoir être réalisée lors de l'exécution et, pour cela, prendre en compte :

- les méthodes d'exécution probables, notamment le mode d'extraction (frontale ou en couches) et le lieu du traitement (dans le déblai ou sur le remblai),
- les moyens qui seront présents sur le chantier pour l'identification des sols,
- les possibilités de distinguer les différents sols à partir de tests visuels, tactiles ou autres moyens rapides pouvant se substituer aux essais conventionnels.

Bien qu'à ce stade, beaucoup de ces éléments ne soient qu'approximativement évaluables, il convient que le projeteur et le responsable de l'étude examinent les scénarios de traitement les plus réalistes pour le chantier considéré et qu'ils définissent en commun le mode de constitution des échantillons à soumettre à l'étude de formulation. Il serait en effet aberrant, même si cela peut se justifier du point de vue de la réaction du sol vis-à-vis du traitement, de multiplier le nombre des zones, et par conséquent celui des échantillons à soumettre à l'étude de formulation, alors qu'il est probable que les procédés d'extraction et les moyens d'identification utilisés sur le chantier ne permettront pas d'assurer la finesse de sélection correspondante.

Cet aspect peut, quelques fois, conduire le projeteur à imposer dans le DCE des modalités d'exécution particulières comme la technique d'extraction, le lieu de traitement, le mode de malaxage, etc., mais, le plus souvent, il sera demandé aux soumissionnaires de proposer ces modalités dans le SOPAQ accompagnant leur offre et selon l'appréciation du maître d'œuvre, elles pourront être intégrées dans le PAQ (cf. § B-1.6.1.2. et tab. B-V).

☛ b. L'étude de formulation

Elle a pour objet d'établir, généralement sous forme d'abaques, les règles régissant les dosages à appliquer à un sol (ou une famille de sols situés dans une zone du profil géotechnique donnée), en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution [9].

Le cas échéant, si le contexte géologique laisse apparaître une probabilité significative de présence dans le sol d'éléments perturbateurs tels que : matières organiques, sulfates, nitrates, etc., une vérification de l'aptitude du sol à être traité avec le produit envisagé doit préalablement être réalisée à partir de l'essai décrit dans la norme NF P 94-100 en se limitant à la seule observation des gonflements.

L'aptitude du sol au traitement peut être considérée comme acquise si le gonflement volumique reste inférieure ou égal à 10 % (cf. C1-2.1.).

La méthodologie de l'étude de formulation consiste à humidifier la fraction 0/20 mm des échantillons, constitués au cours

L'indice portant immédiat (IPI) du sol à sa teneur en eau naturelle est le paramètre qui, au stade des études, est souvent le mieux adapté pour déterminer le dosage du produit de traitement à introduire dans le sol.



de l'étude de qualification, à trois teneurs en eau (on retient autant que possible les valeurs extrêmes de la plage des états hydriques prévisibles pour la période d'exécution et la moyenne des valeurs mesurées lors des reconnaissances). Les échantillons ainsi préparés sont mélangés à des dosages croissants de produit de traitement (au moins trois dosages par teneur en eau) choisis dans un domaine économique réaliste (dans le contexte français actuel et pour le cas général où le produit de traitement est de la chaux vive, il est admis de ne pas conduire les études au-delà de dosages de 4 à 5 %). Pour réaliser l'humidification des échantillons et leur mélange avec le produit de traitement, l'utilisation du malaxeur-désagrégateur décrit dans l'annexe informative de la norme NF P 94-093 s'impose quasiment, étant donné que les sols concernés seront presque toujours plus ou moins plastiques (*cf.* § C1-2.3.1.).

Chaque mélange est ensuite compacté selon les conditions opératoires définies dans la norme NF P 94-093 et on détermine la valeur de l'IPI de chacun d'eux conformément à la norme NF P 94-078. Les valeurs trouvées sont reportées sur des graphes tels que ceux représentés sur la figure B-1 qui présente un exemple d'étude de formulation du traitement d'un limon de classe A₂ avec de la chaux vive.

☛ c. L'identification du produit de traitement

Toute étude de formulation réalisée pour définir la solution de base soumise à l'appel d'offres doit se faire avec un produit de traitement identifié selon les caractéristiques prises en compte dans les normes ou les avis techniques en vigueur (*cf.* § A-1.2.).

☛ d. Niveaux des études géotechniques à engager

Le tableau B-II présente le contenu général des différents niveaux d'études géotechniques et, en correspondance, la phase d'élaboration du projet où ils sont habituellement engagés.

☛ e. Prise en compte de la météorologie

L'établissement à partir des données statistiques (à rechercher auprès des services de la Météorologie Nationale ou reprises de dossiers de chantiers réalisés à proximité) d'une étude météorologique du site, déjà recommandée pour les chantiers courants, est encore davantage justifiée s'il est prévu des traitements de sols [38] [39] [40]. Une telle étude comportant notamment l'établissement du bilan hydrique « précipitation-évaporation » annuel (avec ses dispersions possibles) permet de préciser les périodes de l'année les plus propices à l'exécution des travaux de traitement (ou inversement évaluer les surcoûts induits si, pour différentes raisons, ces périodes ne peuvent être respectées).

● 1.3.2. Étude économique

À partir des résultats des études géotechnique et météorologique, il convient de procéder à l'évaluation économique de la solution « traitement » et de la comparer avec les solutions alternatives possibles sur le chantier considéré.

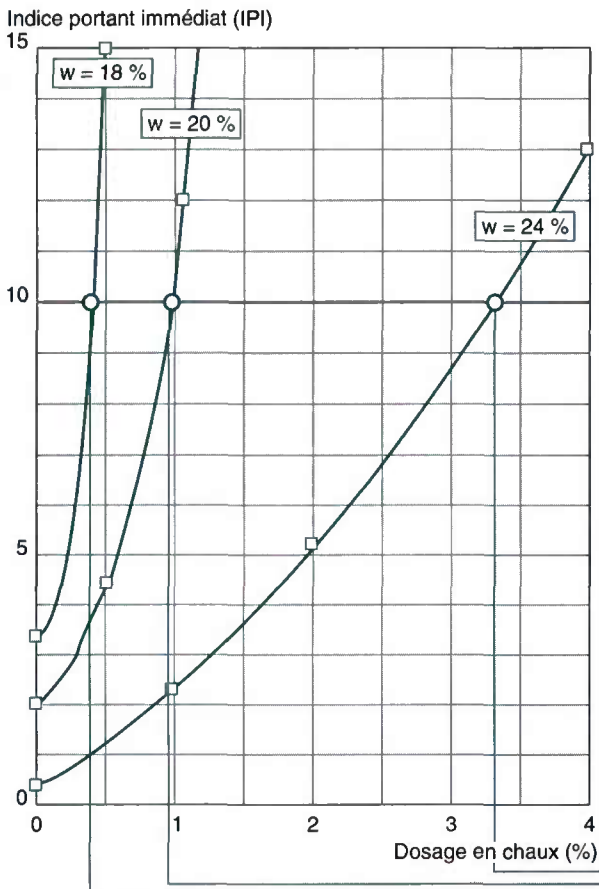
Cette comparaison est conduite dans un premier temps selon les principes développés au § A-3.3. ainsi que dans l'annexe 4. Il sera cependant souvent avantageux de pousser l'analyse en évaluant plus finement l'influence de certains aspects spécifiques au chantier (respect, voire réduction des délais de réalisation, bilan des nuisances créées par le recours à un emprunt ou par l'émission de poussières de produit de traitement, intérêt de réaliser un mouvement de terres n'exigeant ni emprunt, ni dépôt hors de l'emprise du projet, etc.).

Tableau des paramètres mesurés au cours d'une étude de formulation du traitement d'un sol pour « réutilisation en remblai »

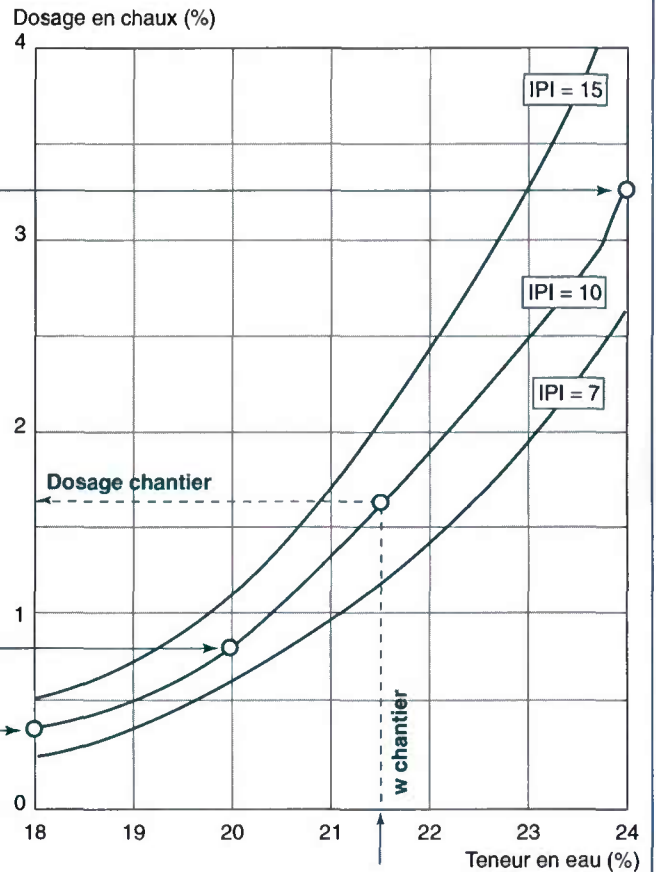
Paramètres		Dosages en chaux (%)				
		0	0,5	1	2	4
W_{nat} du sol 18 %	IPI	3	15	23,5	35,5	27
	$W_{sol\ traité}$ (%)	18,1	17,6	17,1	16,4	14,7
	ρ_d (t/m^3)	1,73	1,73	1,70	1,67	1,57
W_{nat} du sol 20 %	IPI	2	5,5	14	23,5	23,5
	$W_{sol\ traité}$ (%)	19,7	19,6	19,3	18,7	17,4
	ρ_d (t/m^3)	1,67	1,69	1,69	1,68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

Figure B-1.
Exemple de présentation des résultats d'une étude de formulation du traitement d'un sol (limon de classe A₂) pour réutilisation en remblai.

Evolution de l'indice portant immédiat (IPI) en fonction du dosage en chaux pour différentes teneurs en eau du sol



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



■ 1.4. Matériels d'exécution

● 1.4.1. Matériels de stockage des produits de traitement

Les éléments concernant ce sujet ont été développés au § A-4.1.

● 1.4.2. Engins d'épandage

Les éléments concernant ce sujet ont été pour l'essentiel développés au § A-4.2.

Les épandeurs à doseur volumétrique asservis à la vitesse de déplacement sont les engins d'épandage les plus utilisés actuellement. Ils sont bien adaptés pour cette application du traitement des sols.



Dans l'application du traitement à la réutilisation de sols trop humides, l'épandage constitue souvent la séquence la plus critique en raison des difficultés rencontrées par les épandeurs pour circuler sur ces sols.

Pour les chantiers où le traitement représente un coût important et pour lequel le produit de traitement consommé est rémunéré séparément, il est recommandé de s'assurer de leur bon état de fonctionnement et de la dextérité du conducteur en procédant à la mesure du coefficient de variation de la masse épandue, conformément à la méthode décrite dans l'annexe 6. La valeur de ce coefficient ne doit pas excéder 15 % (cf. § B-1.6.1. et annexe 8).

Les autres aspects importants à considérer dans le choix d'un épandeur sont la cohérence de sa productivité en relation avec celle de l'ensemble de l'atelier de terrassement ainsi que son comportement vis-à-vis des émissions de poussières (cf. tab. A-IV).

● 1.4.3. Engins de préparation des sols

En général, il n'y a pas lieu d'exécuter une préparation particulière du sol dans cette application, à l'exception des craies peu denses, humides ou très humides (cf. GTR) dont une déstructuration peut s'avérer avantageuse pour la productivité des ateliers de malaxage.

Si la présence d'éléments blocaillieux pose des problèmes de malaxage, la solution est davantage dans la recherche d'une technique d'exécution adaptée plutôt que dans la modification de la granularité du sol (cf. § B-1.5.).

● 1.4.4. Engins de malaxage

Comme cela a été indiqué au § A-4.4., les charrues à disques ou à socs sont les matériels de malaxage adaptés (techniquement et économiquement) au traitement des sols dans l'objectif considéré ici.

Les gros pulvérisateurs de sols à arbre horizontal peuvent évidemment être utilisés dans les sols dont la granularité permet leur emploi, mais leur surcoût éventuel par rapport aux charrues n'est justifié que s'il est compensé par une économie de produit de traitement (du fait de l'assèchement plus élevé qu'ils provoquent, toutes choses égales par ailleurs) ou dans le cas du traitement des PST (cf. § B-2.4.).

Le malaxage et l'aération produits par les charrues peuvent être très avantageusement complétés par un chargement-transport-déchargement réalisé avec des décapeuses auto-chargeuses.

Malaxage



Charrue à disques de 1 m de diamètre d'un poids de 7 t, équipée d'un dispositif hydraulique de relevage sur un essieu à pneumatique et tractée par un tracteur de 400 CV.

Charrue à disques



Malgré son poids et le diamètre de ses disques, la profondeur de malaxage ne dépasse pas 0,20 m. Toutefois, une mouture satisfaisante est rapidement obtenue (au premier plan, mouture obtenue après une passe, et au second plan celle obtenue à la seconde passe).



Grosse charrue à socs portée à l'arrière d'un tracteur de 400 CV.

Charrue à socs



La profondeur de malaxage atteint aisément 0,7 m, mais l'obtention d'une mouture satisfaisante nécessite, en général, un nombre de passes double de celui d'une charrue à disques.

❶ L'épaisseur de cette couche dépend du D_{\max} des plus gros éléments blocailleux présents dans le sol. En général, il n'est pas conseillé de dépasser une épaisseur de 3 à 5 D_{\max} .

❷ Une variante de cette méthode peut être également envisagée. Elle consiste à réaliser l'épandage du produit de traitement comme dans la méthode décrite sur la figure B-3, puis immédiatement à procéder à une scarification sur l'épaisseur de la couche que l'on prévoit d'extraire et enfin de charger et transporter le mélange « grossier » ainsi obtenu, avec des ateliers chargeurs (ou pelle)-dumper. Le déchargement-régalaage doit être réalisé comme indiqué pour la méthode décrite sur la figure B-3. Il est, toutefois, permis de penser que l'effet de malaxage produit par la décapeuse auto-chargeuse devrait être sensiblement plus efficace que celui de la scarification (l'exécution de cette scarification peut, de toutes façons, toujours avantageusement s'ajouter à la pratique décrite sur la figure B-3).

● 1.4.5. Engins de compactage

Ce sont les engins utilisés pour le compactage des corps de remblai. Leurs modalités d'utilisation sont celles indiquées dans les tableaux du GTR.

■ 1.5. Techniques d'exécution

● 1.5.1. Technique courante

Le traitement appliqué à la réutilisation des sols sensibles à l'eau trop humides est quasiment toujours réalisé par traitement « en place ». La technique courante consiste à épandre la masse de produit de traitement, calculée pour l'épaisseur de sol malaxée prévue (cf. A-4.2.1.), à la mélanger avec le sol, le plus souvent à l'aide de charrues (à disques ou à socs), jusqu'à obtention d'une mouture présentant de visu un aspect (teinte et « mouture ») homogène. Ensuite, suivant les cas, soit on charge et transporte le mélange à son lieu de mise en œuvre (traitement au déblai), soit on le compacte directement après malaxage (traitement au remblai).

Des modalités différentes, décrites ci-après, peuvent parfois s'imposer pour s'adapter aux particularités de certains chantiers.

● 1.5.2. Mélange par la technique dite du « dépôt-reprise »

Cette technique permet de mélanger des sols comportant des éléments blocailleux de $D_{\max} > 250$ à 350 mm (valeur considérée comme limite pratique pour le malaxage avec des charrues). Elle est réservée toutefois quasi exclusivement au traitement à la chaux car incompatible en principe avec le phénomène de prise hydraulique.

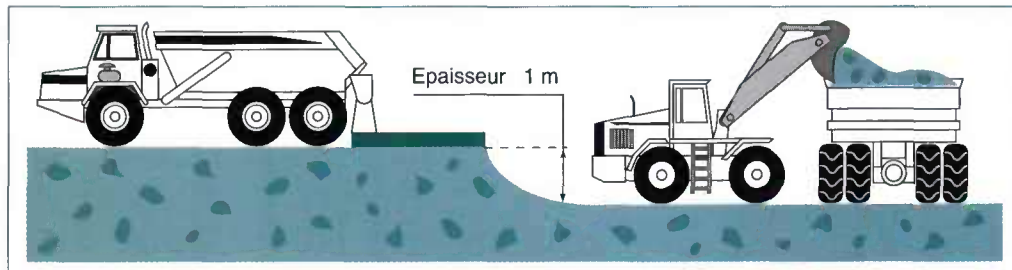
Elle s'exécute de la manière suivante (fig. B-2).

La quantité de produit de traitement correspondant au dosage choisi, calculée pour l'épaisseur de la couche qu'il est prévu d'extraire ❶, est épandue sur le sol. L'ensemble constitué par le matériau de cette couche et le produit de traitement épandu est chargé, transporté puis mis en dépôt provisoire. Celui-ci est profilé et légèrement compacté pour minimiser les entrées d'eaux pluviales. Au moment voulu (qui peut être plusieurs jours, semaines, voire plusieurs mois plus tard), le dépôt est repris, en extraction frontale, pour réaliser le remblai.

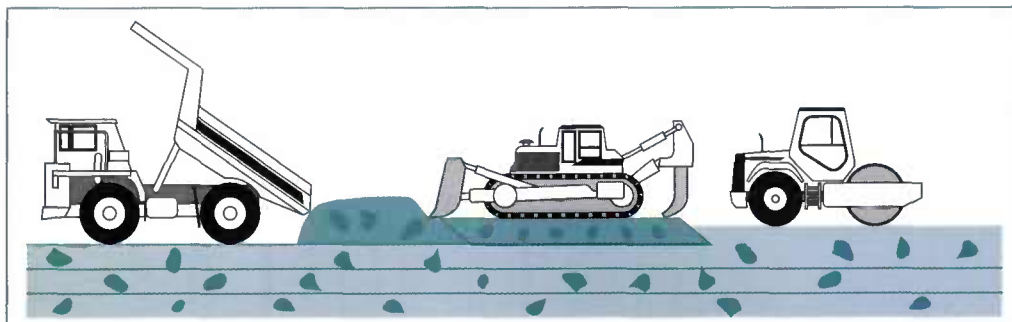
Cette technique améliore l'homogénéité du sol du déblai (en nature et en état) en même temps qu'elle réalise un mélange de qualité généralement suffisante pour une mise en remblai, et ceci, sans utiliser de matériel de malaxage spécifique. Elle est cependant propice aux émissions de poussières de produit de traitement, notamment durant les séquences d'épandage et de chargement.

Avec certains matériaux blocailleux ne comportant qu'une proportion relativement faible de mortier (classes $C_1 B_i$ et $C_2 B_i$), il n'est pas indispensable de passer par la mise en dépôt provisoire à condition que leur D_{\max} permette de les extraire à l'aide de décapeuses auto-chargeuses (fig. B-3a). Dans ce cas, il faut décharger le mélange sur la couche en cours de régalaage et le régaler en le poussant en totalité à l'avant de la couche (fig. B-3b). Ce mode de mise en œuvre nécessite un supplément de moyens et d'énergie de régalaage (par rapport au mode décrit sur la figure B-2b), mais celui-ci contribue avantageusement à compléter le malaxage réalisé par la seule décapeuse auto-chargeuse. En outre, en opérant ainsi, on réduit considérablement la ségrégation qui se produit lors du déchargement, dans le cas des sols des classes B et C en particulier ❷.

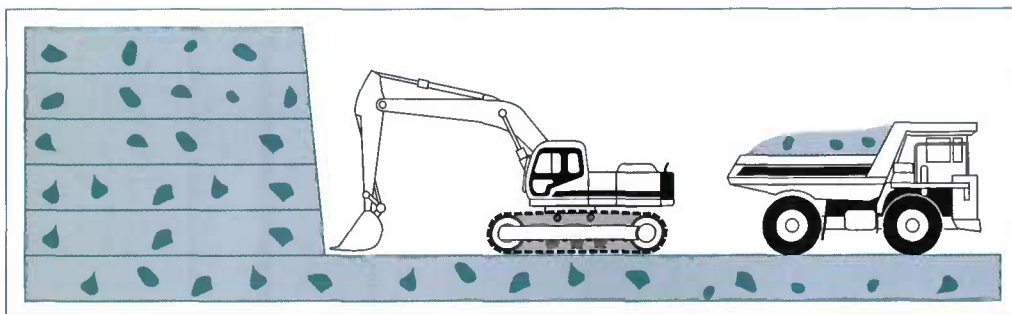
Figure B-2. Schéma de la réalisation du mélange par la technique dite du « dépôt-reprise »



a. *Épandage de la quantité de produit de traitement correspondant au dosage visé et à l'épaisseur de matériau extraite et chargée.*

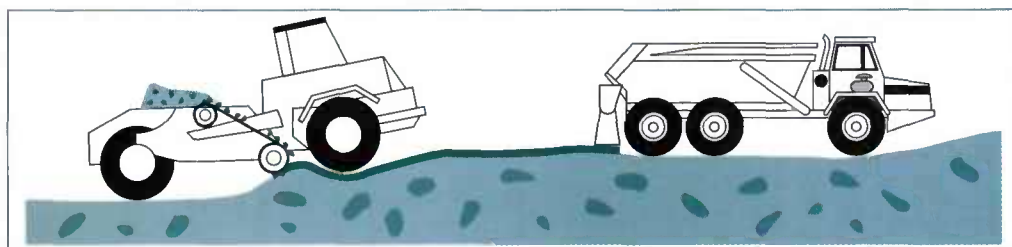


b. *Constitution du dépôt provisoire : déchargement, réglage, compactage léger de chaque couche élémentaire et fermeture de la plate-forme superficielle (dans le cas de sols sensibles à la ségrégation, il est avantageux de décharger le mélange sur la couche en cours de réglage et de le pousser à l'avant de la couche réglée comme indiqué sur la figure B-3).*

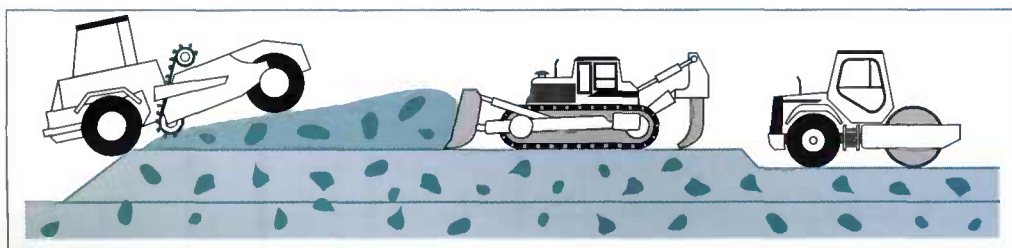


c. *Reprise du dépôt par extraction frontale réalisant une bonne homogénéisation.*

Figure B-3. Mélange de graves limoneuses avec la chaux directement par chargement et déchargement à l'aide de décapeuses auto-chargeuses



a. *Extraction à la décapeuse auto-chargeuse du sol avec le produit de traitement.*



b. *Déchargement et poussage au buteur à l'avant de la couche en cours de réglage.*



L'association sur le même tracteur d'une charrue (à disques dans ce cas) et d'une lame spéciale équipée de socs, dont l'écartement a été fixé d'après le D_{max} du matériau, s'est avérée une bonne solution technique et économique pour mélanger des moraines glacières (classes C_1B_4h) avec de la chaux vive.



La qualité du malaxage obtenue avec des charrues peut être très sensiblement améliorée si la reprise du mélange est réalisée avec des décapeuses auto-chargeuses.



Dans le cas de traitement « au remblai », le compactage à l'aide de compacteurs à « pieds dameurs » participe avantageusement à l'aération et au malaxage des sols argileux humides.

● 1.5.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai

L'intérêt de traiter dans le déblai est de tirer profit des manipulations que l'on fait subir au sol au cours des phases successives de chargement, déchargement, régilage, etc., pour améliorer l'homogénéité du mélange sol-chaux et pour produire l'assèchement maximal en conditions météorologiques évaporantes. En procédant ainsi, on améliore également la traficabilité des engins dans le déblai.

Un autre intérêt est de limiter, le cas échéant, la diffusion des poussières de produit de traitement en confinant le chantier de traitement à l'intérieur des talus du déblai.

L'intérêt d'exécuter le traitement sur le remblai est de pouvoir minimiser les quantités de matériaux à traiter. En effet, en opérant au stade ultime de la mise en œuvre, il est possible de sélectionner les zones exigeant réellement un traitement à partir de l'observation du comportement du sol (ornières de plus de 10 à 15 cm sous les roues des engins de transport) ou à partir de mesures (portance à la plaque ou à la dynaplaque, IPI ou teneur en eau du sol).

Le choix du lieu de traitement peut alors découler des considérations suivantes :

- si, au vu des résultats des reconnaissances, il apparaît que l'état du sol nécessite le recours au traitement dans la quasi-totalité de la masse du déblai, il est préférable de prévoir le traitement « au déblai »,
- si l'on constate, au contraire, qu'une part relativement importante des sols situés dans certaines parties du déblai mal localisées à l'étude sont susceptibles d'être réutilisées sans traitement, il pourra se révéler plus avantageux de traiter localement « autant que de besoin » sur le remblai, en fonction de l'observation du comportement du matériau à sa mise en œuvre.

En pratique, d'autres considérations, notamment liées aux contraintes d'exécution et d'organisation du chantier (délais, quantités, sensibilité du chantier aux émissions de poussières, etc.), peuvent l'emporter sur les règles générales ci-dessus, mais, dans tous les cas, le choix du lieu de traitement constitue un point sensible soumis à l'acceptation du maître d'œuvre, compte tenu de son incidence sur le coût et la qualité technique de l'ouvrage (cf. § B-1.6.).

● 1.5.4. Technique de malaxage spécifique à la craie humide peu ou moyennement dense [18]

Cette classe de craie présente un comportement spécifique lié à sa structure poreuse (donc friable) saturée ou proche de la saturation. Au cours des opérations de terrassement, il y a production d'une matrice fine, d'autant plus importante que la friabilité est grande et d'autant moins consistante que la teneur en eau de la craie en place est élevée.

Dès que la proportion de la matrice dépasse des valeurs de 5 à 10 %, elle communique son comportement à l'ensemble du matériau. Pour pouvoir réutiliser ces matériaux en remblai, il n'est donc pas nécessaire d'abaisser la teneur en eau de la masse de la craie, mais seulement celle de la matrice produite en cours de travaux.

Ceci peut être obtenu de la manière décrite ci-après (fig. B-4). On réalise un traitement de la craie dans sa masse, sur l'épaisseur permise par l'engin de malaxage utilisé, en recherchant au cours de cette opération une production maximale de matrice. L'obtention d'une mouture 0/20 mm doit être recherchée et, pour ce faire, il faut utiliser dans toute la mesure du possible un malaxeur à arbre horizontal. Le dosage en produit de traitement, notamment s'il s'agit de chaux vive, doit être suffisamment élevé pour que la matrice produite se présente dans un état pulvérulent d'aspect sec (recherche d'un IPI sur la mouture 0/20 mm > 20).

On procède alors à l'extraction simultanée de la couche ainsi traitée et d'une couche de craie en place (d'une épaisseur de l'ordre du mètre), à l'aide de chargeurs ou de pelles pour éviter une trop forte déstructuration du matériau en place, et donc une production supplémentaire de matrice qu'il faudrait assécher. L'épaisseur de la couche à extraire est ajustée en fonction de l'observation du comportement du matériau à la mise en remblai (s'il conserve une grande déformabilité, il faut réduire cette épaisseur et inversement)

Cette technique permet de réutiliser des craies humides en minimisant les quantités de produit de traitement. Elle n'exclut cependant pas la technique traditionnelle utilisant un malaxage en place à l'aide de charrues, notamment lorsqu'il est difficile de fabriquer la matrice à l'aide d'un pulvérisateur à arbre horizontal (présence de silex, par exemple).

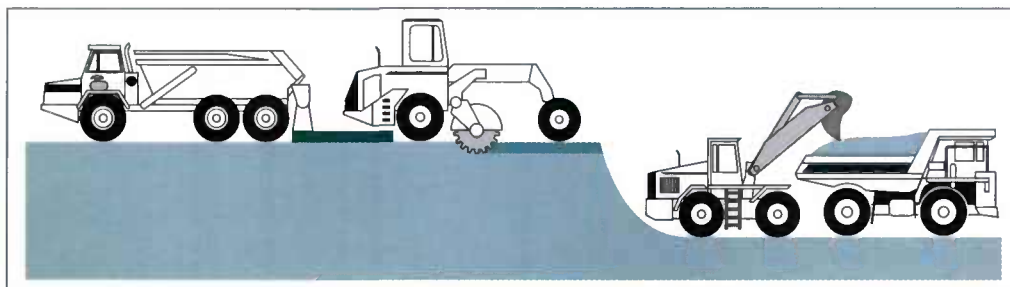


Figure B-4. Technique de traitement spécifique au réemploi en remblai des craies friables trop humides (classes R_{12} et R_{13h}).

■ 1.6. Assurance de la qualité

L'assurance de la qualité de la tâche « traitement des sols appliqué à la réutilisation en remblai des sols sensibles à l'eau trop humides » a pour objet, d'une part, de rechercher la consommation minimale de produit de traitement garantissant la qualité requise pour un matériau de remblai tout en permettant une productivité du chantier cohérente avec les délais d'exécution fixés par le maître d'ouvrage et, d'autre part, d'assurer la protection de l'environnement du chantier vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement.

● 1.6.1. Formulation des stipulations

☛ 1.6.1.1. Prise en compte des aléas sur les quantités de produits de traitement et de matériaux à traiter

Comme évoqué au § B-1.1.3., la particularité de cette tâche est sa forte potentialité d'aléas sur les quantités de matériaux à traiter et de produits à utiliser, aléas qui ont rapidement des incidences financières importantes.

① Valeurs indicatives pouvant être ajustées au contexte particulier du chantier en fonction de l'expérience locale.

② Cette méthode de vérification de la portance minimale peut le plus souvent se limiter à un constat visuel. Elle comporte, toutefois, des difficultés en ce qui concerne la mesure et l'interprétation du matelassage, lorsque ce phénomène se manifeste. Il convient alors de privilégier les méthodes s'appuyant sur l'IPI ou les modules à la plaque.

Pour établir des stipulations répartissant au mieux ces incidences financières entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur, le prescripteur peut, en fonction du contexte du chantier, choisir entre l'un ou l'autre des trois schémas ci-après.

□ **Schéma 1**

Le contrat stipule que l'entrepreneur doit faire une proposition de prix du mètre cube de matériau mis en remblai incluant toutes les sujétions de mise en œuvre, y comprises celles induites par la nécessité d'un traitement éventuel.

Il impose, par ailleurs, que le matériau après mise en œuvre respecte des caractéristiques de portance minimales.

Ces valeurs de portance peuvent être exprimées :

➤ soit de préférence par des valeurs de module à la plaque ou à la dynaplaque mesurées sur le matériau après mise en œuvre. À défaut d'autres valeurs jugées plus pertinentes pour le chantier considéré, les valeurs à prescrire pourront être celles indiquées dans le tableau B-III ① ;

TABLEAU B-III
Valeurs minimales de module à obtenir après mise en œuvre

Classes de matériaux (selon classification GTR 92)	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃	B ₂ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ B ₅ C ₁ B ₅ C ₂ B ₅ R ₁₂ R ₁₃ F ₂
Valeurs minimales du module à la plaque ou à la dynaplaque à obtenir sur le matériau mis en remblai (MPa) *	35	30	25	40

* 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 $I_{CBR} \geq 1$ (cf. § B-2.2.)
Par ailleurs, ces valeurs s'entendent obtenues sur le matériau correctement compacté (qualité q4 définie dans le GTR mais, à l'inverse, la vérification de leur obtention ne traduit pas nécessairement que le compactage est satisfaisant

➤ soit par des valeurs d'IPI (ou de teneur en eau lorsque la corrélation w-IPI a été établie) mesurées sur des échantillons de sol traité prélevés avant compactage. Dans ce cas, les valeurs à prescrire pourront être celles du tableau B-I donnant, pour les différentes classes de sols, les valeurs minimales à partir desquelles un traitement peut être envisagé ;

➤ soit, à défaut de valeur de module ou d'IPI, par une valeur maximale de la profondeur d'ornièrre (ou de l'amplitude du matelassage) observée sous le passage des engins de transport chargés (décapeuses tombereaux, etc.) roulant sur le matériau après mise en œuvre. En l'absence d'éléments permettant de la préciser davantage, une valeur de l'ordre de 7 à 10 cm (5 à 7 cm pour les PST) peut être retenue pour l'ensemble des sols sensibles à l'eau ②.

Ce schéma a l'avantage de laisser un maximum d'initiative à l'entrepreneur dans le choix de ses moyens et techniques d'exécution, voire dans le choix du produit de traitement. En outre, le contrôle de conformité est relativement simple et léger puisqu'il se limite à la vérification du respect de la prescription d'IPI, de portance ou de profondeur d'ornièrres fixée.

En revanche, étant donné qu'il fait supporter à l'entrepreneur la majeure partie des risques induits par les aléas de l'état hydrique du sol et des situations météorologiques, il ne peut s'appliquer qu'aux chantiers :

- dont la prestation « traitement » ne représente pas un enjeu économique déterminant dans le marché,
- dont le DCE fixe la date d'autorisation du démarrage des travaux en même temps que le délai de réalisation du chantier,
- pour lesquels il est fourni un dossier géotechnique et météorologique suffisamment complet pour que l'entrepreneur soit à même d'évaluer, avec un risque financier acceptable, les quantités de matériaux à traiter et de produit de traitement à utiliser ❶.

❑ Schéma 2

Le contrat stipule que la totalité du produit de traitement employé est rémunérée à l'entrepreneur au prix unitaire proposé dans son offre et sur fourniture des bons de livraison correspondants, mais que les quantités à utiliser sont fixées par le maître d'œuvre en fonction de la nature et de l'état des sols effectivement constatés au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

L'application de ce schéma met l'entrepreneur à l'abri des risques liés aux aléas météorologiques et géotechniques et permet une optimisation des quantités de matériaux traités et des quantités de produit de traitement consommées. En contrepartie, le maître d'œuvre doit s'assurer de :

- la conformité du produit de traitement utilisé avec les stipulations du marché,
- l'identification des sols terrassés, avec une anticipation suffisante sur les travaux (cf. § B-1.6.2.2.),
- la fiabilité du mode de détermination des dosages devant être appliqués et l'obtention de ces dosages sur le chantier (cf. § B-1.6.2.2.).

Ce schéma est à retenir dans le cas général et, plus particulièrement, pour les chantiers importants et complexes, pour lesquels il est illusoire de penser que les offres des entreprises puissent être établies à partir d'hypothèses réalistes (du fait du délai de réponse réduit dont elles disposent en général eu égard aux aléas liés notamment à la variabilité des terrains et aux conditions météorologiques).

❑ Schéma 3

Dans ce schéma, le contrat stipule, comme dans le schéma 2, que l'entrepreneur est rémunéré de la totalité du produit de traitement utilisé et de la quantité de matériau traité, mais il impose des valeurs de portance minimales et maximales qui définissent les limites à partir desquelles le traitement doit être respectivement engagé et arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage).

Ce schéma apporte une assurance sur l'absence de surconsommation ou d'insuffisance importantes de produit de traitement, met l'entrepreneur à l'abri des aléas sur les quantités de produit de traitement tout en lui laissant une grande part d'initiative pour conduire le chantier ; enfin, il ne requiert pas un contrôle de conformité plus complexe que dans le premier schéma, mais d'ampleur double toutefois, étant donné qu'il convient de vérifier que les caractéristiques de portance constatées sur le chantier sont bien comprises dans la plage délimitée par les valeurs minimales et maximales stipulées.

Les valeurs minimales de portance à stipuler peuvent être exprimées comme dans le cas du schéma 1.

❶ Ce dossier doit notamment comporter les éléments statistiques permettant d'évaluer si les conditions météorologiques constatées durant la période effective des travaux peuvent être considérées comme normalement prévisibles ou non (cf. recommandation « Météorologie et terrassements » et les tables des normales climatologiques établies par la Direction de la Météorologie Nationale).

❶ Valeurs indicatives pouvant être ajustées au contexte particulier du chantier en fonction de l'expérience locale.

❷ Cette méthode de vérification de la portance minimale peut le plus souvent se limiter à un constat visuel. Elle comporte, toutefois, des difficultés en ce qui concerne la mesure et l'interprétation du matelassage, lorsque ce phénomène se manifeste. Il convient alors de privilégier les méthodes s'appuyant sur l'IPI ou les modules à la plaque.

Les valeurs de portance maximales peuvent être exprimées :

- soit de préférence par des valeurs de module à la plaque ou à la dynaplaque mesurées sur le matériau après mise en œuvre. À défaut d'autres valeurs jugées plus pertinentes pour le chantier considéré, les valeurs à prescrire pourront être celles indiquées dans le tableau B-IV ❶,
- soit reprendre les valeurs maximales de l'IPI à obtenir sur le matériau traité indiquées dans le tableau B-I,
- soit, à défaut de valeurs de module ou d'IPI, par une valeur maximale de la profondeur d'ornière (ou de l'amplitude du matelassage) observée sous le passage des engins de transport chargés (décapeuses tombereaux, etc.) roulant sur le matériau après mise en œuvre ❷. En l'absence d'éléments permettant de la préciser davantage, une valeur de profondeur d'ornière de l'ordre de 1 à 3 cm peut être retenue.

TABLEAU B-IV
Valeurs des modules au-delà desquelles le traitement doit être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)

Classes de matériaux (selon classification GTR 92)	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁	A ₂ B ₅ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R ₃₄	A ₃ C ₁ A ₃ C ₂ A ₃	B ₂ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ B ₅ C ₁ B ₅ C ₂ B ₅ R ₁₂ R ₁₃ F ₂
--	--	---	--	---

Valeurs des modules à la plaque ou à la dynaplaque au-delà desquelles le traitement doit être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage) (MPa) *

50 40 30 60

* 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 $I_{CBR} \geq 1$ (cf. § B-2.2.)
Par ailleurs, ces valeurs s'entendent obtenues sur le matériau correctement compacté (qualité q4 définie dans le GTR mais, à l'inverse, la vérification de leur obtention ne traduit pas nécessairement que le compactage est satisfaisant

☛ **1.6.1.2. Autres stipulations techniques pouvant être prescrites dans le CCTP (ou dans le PAQ sur la base des engagements pris par l'entrepreneur dans le SOPAQ)**

Elles sont récapitulées dans le tableau B-V.

L'annexe 8 propose un cadre-type pour la rédaction des stipulations concernant le traitement des sols trop humides pour réutilisation en remblai. Ce cadre prend en compte les trois schémas évoqués précédemment.

● **1.6.2. Contrôle de l'exécution du traitement**

☛ **1.6.2.1. Actions générales à exécuter quel que soit le schéma retenu pour la rémunération de la tâche**

Elles sont indiquées dans le tableau B-VI.

TABLEAU B-V
Principales clauses techniques relatives à la tâche « traitement pour réutilisation des sols trop humides en remblai » pouvant être prescrites dans le CCTP ou transférées dans le PAQ

Aspect considéré	Clauses pouvant être prescrites dans le CCTP ou introduites dans le PAQ	Observations
Produits de traitement	Acceptation du produit de traitement par le maître d'œuvre Nature et caractéristiques du produit de traitement à utiliser	Cette clause doit être stipulée dans le CCTP quel que soit le schéma retenu pour la rémunération de la tâche Cette clause est surtout justifiée dans le cas où la règle de rémunération de la tâche est inspirée des schémas 2 et 3 et, dans ces cas, il est préférable en général de la prescrire dans le CCTP plutôt que de la faire figurer dans le PAQ
Capacité de stockage	Capacité de stockage correspondant, par exemple, à au moins une journée de travail à la cadence de production moyenne prévue	Cette clause n'a pas, en général, à être stipulée dans le CCTP, mais seulement prévue dans le PAQ (sauf dans le cas des gros chantiers éventuellement)
Épandage	Acceptation du (ou des) épandeur(s) Valeur maximale du coefficient de variation du (ou des) épandeur(s)	Cette clause est à stipuler dans le CCTP Elle est justifiée seulement pour la rémunération de la tâche, dans les schémas 2 et éventuellement 3 Cette clause n'est justifiée que dans le cas où la règle de rémunération de la tâche est inspirée des schémas 2 et éventuellement 3
Matériels de malaxage et/ou techniques d'exécution particulières	Acceptation du type, nature, nombre et caractéristiques des engins de compactage Techniques d'exécution particulières	La stipulation dans le CCTP de clauses sur ces points ne doit être envisagée que si la nature des matériaux les justifie et dans le cas où la règle de rémunération de la tâche est inspirée du schéma 2 et, dans une moindre mesure, du schéma 3 Les clauses sur ces points doivent figurer dans le PAQ quel que soit le schéma retenu
Compactage	Type, nature, nombre et caractéristiques des engins de compactage	Les clauses sur ce point ne sont pas spécifiques à la tâche. Ce sont celles applicables à la réalisation des remblais en général
Caractéristiques minimales du sol traité	Valeurs minimales de l'IPI du sol ou du module de déformabilité ou de la profondeur d'ornière sous les engins de transport	La stipulation des valeurs minimales pour l'un des trois paramètres envisagés ne s'impose que pour les cas où la règle de rémunération de la tâche s'inspire des schémas 1 et 3. Ces valeurs doivent alors figurer dans le CCTP, avec possibilité de les ajuster dans le PAQ au vu des constatations effectuées en phase de préparation de chantier (lors de la démonstration de la convenance des méthodes et des moyens en particulier)
Caractéristiques maximales du sol traité	Valeurs maximales de l'IPI du sol ou du module de déformabilité ou de la profondeur d'ornière sous les engins de transport	La stipulation des valeurs maximales pour l'un des trois paramètres envisagés ne s'impose que pour les cas où la règle de rémunération de la tâche s'inspire du schéma 3. Ces valeurs doivent alors figurer dans le CCTP, avec possibilité de les ajuster dans le PAQ au vu des constatations effectuées en phase de préparation de chantier (lors de la démonstration de la convenance des méthodes et des moyens en particulier)
Dispositions de protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières	Acceptation des matériels et des dispositions courantes prises vis-à-vis des émissions de poussières Vitesse du vent à partir de laquelle le traitement doit être interrompu Dispositions spéciales (autres que celles indiquées pour les chantiers courants dans l'annexe 5)	Cette clause doit être stipulée dans le CCTP quel que soit le schéma retenu pour la rémunération de la tâche Une valeur maximale doit toujours être stipulée dans le CCTP quel que soit le schéma retenu pour la rémunération de la tâche (cf. annexe 5) Si de telles dispositions s'avèrent nécessaires (cas de chantier « sensible » au sens de l'annexe 5), le prescripteur doit décider s'il est préférable de les prescrire dans le CCTP ou s'il peut attendre les réponses proposées par l'entrepreneur dans son SOPAQ pour les formuler dans le PAQ

TABLEAU B-VI
Actions de contrôle à exécuter quelles que soient les stipulations retenues pour la rémunération de la tâche

Clause du CCTP et/ou modalité particulière du PAQ concernée	Objectif(s) recherché(s)	Actions de contrôle à réaliser
Nature et caractéristiques du produit de traitement	Acceptation du produit de traitement	Évaluation de la fiabilité des éléments donnés au maître d'œuvre pour obtenir son acceptation du produit (pour les produits non normalisés essentiellement) Dans le cas de produits de traitement mal connus (issus de sous-produits industriels notamment), garantie de l'absence de nocivité du produit vis-à-vis de l'environnement
Ateliers de traitement	Adéquation des ateliers avec les caractéristiques du chantier	Évaluation à partir d'observations visuelles. Constat du bon état de fonctionnement et du dimensionnement des épandeurs et des malaxeurs aux cadences de chantier prévues
Techniques d'exécution particulières (imposées dans le marché ou prévues dans le PAQ)	Vérification du respect des modalités définissant ces techniques	Observations visuelles éventuellement confirmées par photographies ou bandes vidéo
Émissions de poussières	Vérification de la conformité de l'exécution du traitement avec les règles de l'art et les éventuelles stipulations complémentaires fixées dans le contrat et/ou précisées dans la mise au point du PAQ (cf. annexe 5)	Détection des infractions aux règles de l'art et observation des émissions de poussières confirmées éventuellement par photographies ou bandes vidéo Mesures de la vitesse et de la direction du vent en périodes critiques Si nécessaire, constat des quantités de produits de traitement déposés sur différents supports situés à proximité du chantier

1.6.2.2. Actions de contrôle particulières s'appliquant au cas où les stipulations retenues pour la rémunération de la tâche s'inspirent du schéma 2

Dans ce cas, le contrôle doit apporter l'assurance de la qualité recherchée sur l'optimisation du dosage et sur l'exécution du traitement.

□ Optimisation du dosage

Cette action consiste à identifier la nature et l'état des matériaux au fur et à mesure de l'avancement du chantier et, en fonction de ces éléments et du contexte général du chantier (délais, météo, cadences de mise en œuvre, etc.), à décider si le traitement s'impose et, si oui, d'en fixer les dosages.

Pour ce faire, il faut réaliser des prélèvements dans la zone dont l'extraction est prévue dans les deux jours ouvrables à venir pour confirmer la nature des sols et déterminer leur état hydrique, de préférence par la mesure de leur IPI.

À partir des résultats des études de formulation, il faut décider de la nécessité de traiter, du dosage à appliquer et de la localisation du volume de déblai auquel ces décisions sont applicables (établissement des grilles de décisions journalières du chantier).

L'observation de la profondeur d'ornières produites sous les engins d'approvisionnement constitue un indicateur commode pour décider de la nécessité ou de l'arrêt du traitement du sol en vue de son utilisation en remblai

⇒
Comportement d'un sol ne nécessitant aucun traitement.



Lorsque de telles ornières apparaissent, le traitement devient indispensable.



À défaut de disposer d'études de formulation établies lors de l'étude du projet suffisamment détaillées, il faut s'organiser pour qu'elles soient exécutées en temps voulu à l'avancement (ce qui justifie d'exiger de procéder aux prélèvements avec une anticipation sur les travaux de deux jours au minimum).

Dans la pratique, il faut toutefois admettre que les décisions concernant la nécessité de traiter et les dosages à appliquer puissent, dans certaines conditions (responsable de l'identification expérimenté, sols homogènes, chantier bien organisé et rendu à son « rythme de croisière », etc.), être prises à partir d'estimations visuelles du comportement des sols, mais, dans tous les cas, le maître d'œuvre doit en être informé (point sensible) et pouvoir les modifier s'il le juge nécessaire. Compte tenu de l'incidence de ces décisions sur le coût et la programmation du chantier, on comprend que le maître d'œuvre aura le plus souvent intérêt à réserver cette action au contrôle extérieur ①.

❑ Modalités d'exécution du traitement

En complément des actions définies dans le tableau B-VI, le contrôle de l'exécution du traitement requiert les actions recensées dans le tableau B-VII.

① L'assurance d'avoir effectivement réalisé l'optimisation des dosages est toujours délicate en l'absence d'un suivi continu du chantier par le contrôle extérieur car les excès de dosage, en particulier, ne se détectent pas aisément. À cet égard, on peut indiquer qu'une « surconsommation » de chaux vive de 1 % par rapport à ce qui serait strictement nécessaire au regard des objectifs de stabilité et de traficabilité recherchés équivaut approximativement, dans le cas d'un chantier de traitement produisant 5 000 m³/j, au coût de quinze agents de contrôle !

TABLEAU B-VII
Actions de contrôle relatives à la qualité des produits de traitement
et aux modalités d'exécution du traitement lorsque les stipulations retenues
pour la rémunération de la tâche s'inspirent du schéma 2

Clause du marché et/ou modalité particulière retenue dans le PAQ de la tâche	Aspects concernés	Actions de contrôle à réaliser
Nature et caractéristiques du produit de traitement	Dans le cas de la chaux vive	Vérification de l'origine à partir des bons de livraison + Une mesure de la réactivité par 200 à 500 t livrées
	Dans le cas des ciments	Vérification de l'origine à partir des bons de livraison
	Dans le cas des LSR	Vérification de l'origine à partir des bons de livraison + Prélèvements conservatoires de quelques échantillons
Épandage	Acceptation du (ou des) épandeur(s)	Vérification du bon état d'entretien et de fonctionnement du (ou des) épandeur(s) Pour les chantiers importants, détermination du coefficient de variation de la masse épandue (cf. annexe 6) Le cas échéant, vérification de l'étalonnage des dispositifs de contrôle embarqués sur les épandeurs
	Quantités de produit épandues	Vérification de la conformité des masses de produit épandues avec la valeur fixée : action à réaliser au début de chaque journée de travail de l'atelier de traitement et à chaque modification des consignes de réglage (cf. annexe 6) Recoupements périodiques (à la journée pour les grands chantiers, à la semaine pour les petits et moyens), des masses comptabilisées à partir des bons de livraison et de celles déduites des valeurs préconisées sur le chantier
Malaxage	Homogénéité de la mouture	Vérification en continu de l'adéquation de l'épaisseur malaxée avec la quantité épandue et de l'homogénéité du mélange par observations des modalités de malaxage (état de fonctionnement, nombre de passes, vitesse, homogénéité de teinte et de granulométrie, etc.)

☛ **1.6.2.3. Actions de contrôle particulières s'appliquant**
au cas où les stipulations retenues pour la rémunération de la tâche
s'inspirent des schémas 1 et 3

Dans ces cas, les actions de contrôle, définies dans le tableau B-VI, doivent être complétées par la vérification de la conformité des valeurs des caractéristiques du matériau aux valeurs imposées. Suivant la formulation des spécifications, ces actions consisteront en des mesures soit d'IPI, soit de modules à la plaque ou à la dynaplaque, soit de valeurs de profondeur d'ornières.

□ Schéma 1

Des actions de contrôle ne s'imposent que lorsque l'observation des conditions de traficabilité laissent supposer qu'un traitement serait nécessaire (ou que le dosage appliqué paraît insuffisant).

□ Schéma 3

Des actions de contrôle sont en plus nécessaires pour vérifier que le dosage appliqué ne conduit pas à des valeurs de portance inutilement élevées. Lorsque le principe de contrôle retenu repose sur l'observation des profondeurs d'ornières, il est recommandé au responsable du contrôle d'étalonner son appréciation visuelle sur un minimum de mesures (de portance de préférence), car la sensibilité de ce paramètre vis-à-vis de la détection des sur-dosages est sensiblement plus faible que pour les sous-dosages.

● 1.6.3. Synthèse des actions d'assurance de la qualité

Cette synthèse est destinée à l'établissement du dossier de récolement. Pour les projets autoroutiers, il est souvent utile de récapituler remblai par remblai :

- les anomalies éventuelles, leurs causes et leur mode de traitement,
- le bilan des quantités de produit de traitement consommées tel qu'il ressort du calcul à partir des valeurs fixées par le responsable du pilotage du dosage, d'une part, et les valeurs cumulées des données des bons de livraison, d'autre part,
- la nature, l'origine du (ou des) produit(s) de traitement utilisé(s), et, le cas échéant, les valeurs des caractéristiques d'identification ayant été mesurées,

et si le maître d'œuvre estime y trouver intérêt :

- la proportion des matériaux ayant été traités et la comparaison avec les prévisions de l'étude,
- les plages de variation des caractéristiques géotechniques (nature et état) des différentes formations « effectivement identifiées » en cours d'exécution,
- le recueil des événements météorologiques constatés pendant le chantier (pluviométrie, température vent, etc.) présenté en comparaison avec les hypothèses de l'étude,
- la méthodologie appliquée pour le pilotage du dosage en produit(s) de traitement (méthode, moyens mobilisés, type, nombre de mesures réalisées, valeurs moyennes, dispersion, etc.),
- etc.

2. AUTRES APPLICATIONS DU TRAITEMENT DES SOLS DANS LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS

① Ce qui a, par exemple, pour conséquence (cf. GTR, fascicule II Annexes techniques) :

- soit de permettre, avec une couche de forme en sol traité à la chaux seule de 0,35 m d'épaisseur, de prendre en compte une plate-forme de classe PF₂ (voire PF₃ pour la même épaisseur avec un sol traité chaux + liant hydraulique) au lieu de PF₁ en l'absence de cette amélioration (car le GTR n'autorise pas la mise en œuvre de couche de forme en sol traité sur une PST de classe 1),
- soit, si l'on réalise une couche de forme en matériaux granulaires non traités et pour obtenir une plate-forme de classe PF₂, de réduire cette couche de forme à une simple couche de protection superficielle de quelques centimètres, au lieu d'une épaisseur de 0,75 m de matériaux granulaires en l'absence de cette amélioration.

■ 2.1. Objectifs du traitement

Le traitement d'un sol peut également être envisagé pour réaliser certaines parties de remblai particulières, même si le sol concerné se trouve dans un état hydrique autorisant sa mise en remblai conformément aux règles du GTR.

L'objectif est alors d'obtenir, par le traitement, une rigidification plus ou moins élevée, mais définitive, du matériau traité, afin de lui conférer les caractéristiques mécaniques pouvant être prises en compte dans la conception de l'ouvrage.

Une telle rigidification peut être recherchée notamment dans les applications décrites ci-après.

● 2.1.1. Amélioration de la portance de la partie supérieure des terrassements (PST)

Conformément au GTR, lorsque la PST est constituée de matériaux sensibles à l'eau de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (cas de PST 1), il est prévu la possibilité de l'améliorer sur une épaisseur d'au moins 30 cm par un traitement de sol exécuté selon une technique « remblai ». Si l'effet du traitement peut être considéré comme « durable », on passe alors au cas de PST 4 qui permet de prendre en compte pour le dimensionnement de la chaussée une « arase » de classe AR₂ ①.

● 2.1.2. Remblaiement des zones d'accès difficile

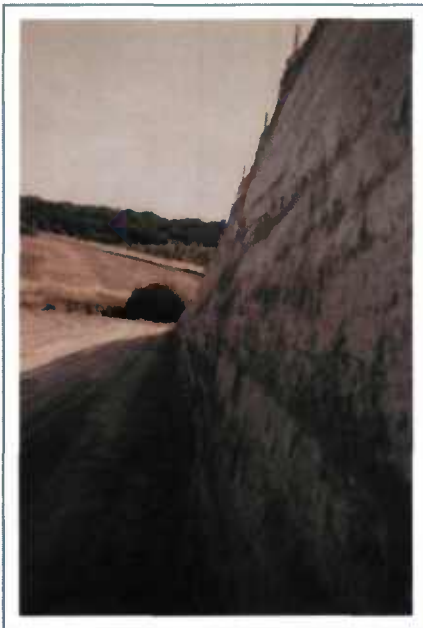
Il s'agit principalement des remblais contigus aux ouvrages d'art, des remblais de tranchées, des remblais de calage des buses et, de manière générale, de tous les remblais réalisés dans des zones exigües ne permettant pas une évolution normale des engins de régalaie et de compactage. Le traitement, dans ce cas, a pour but de conférer aux matériaux une cohésion permanente qui pourra compenser d'éventuelles insuffisances de compactage localisées, toujours difficiles à éviter dans ces zones.

● 2.1.3. Réalisation des parties basses des hauts remblais construits avec des sols sensibles à l'eau ou avec certains matériaux rocheux évolutifs pouvant se trouver temporairement inondés

Il s'agit notamment des matériaux rocheux des classes R₁₂, R₁₃, R₂₃, R₃₄, R₆₃, et tout particulièrement lorsque les conditions hydrologiques du site laissent prévoir la possibilité que la partie basse du remblai puisse se trouver momentanément inondée au cours de la vie de l'ouvrage.



Traitement à la chaux vive de la partie supérieure des terrassements (PST) d'une voie ferrée (reconstruction d'une seconde voie).



Talus vertical taillé dans un remblai en marnes du Keuper traitées à la chaux vive (hauteur : 5 m, quatre ans après sa réalisation).



Soutènement d'un talus de déblai dans un limon réalisé avec de la craie traitée avec un liant hydraulique (hauteur maximale : 6 m, pente : trois vertical pour un horizontal).

Raidissement de talus par traitement de sol

L'action recherchée dans le traitement est une cimentation des éléments du matériau, de manière à éviter des déformations résultant de réarrangements suite à des fracturations provoquées par l'action combinée de l'eau et des contraintes mécaniques.

● 2.1.4. Raidissement des pentes de talus de remblai

Le traitement conférant à un sol une cohésion permanente et ajustable au niveau recherché, il est possible avec des sols traités de raidir les pentes de talus de remblai (pour réduire l'emprise de ces ouvrages, par exemple).

■ 2.2. Performances à rechercher

Elles dépendent de l'application considérée et des particularités du projet et, pour cette raison, doivent dans toute la mesure du possible être déterminées par une étude spécifique.

En l'absence d'une telle étude, on pourra toutefois s'inspirer des valeurs proposées dans le tableau B-VIII.

TABLEAU B-VIII
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	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 B-I majorées d'environ 20 % Les valeurs de 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'éclatement 2 compactées à $\rho_d = 95\% \rho_{dOPN}$ Valeurs à obtenir après 14 j de cure + 14 j d'immersion $\geq 0,5$ à 1 MPa (suivant l'exigüité 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 B-I
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 lorsqu'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

■ 2.3. Études à réaliser

● 2.3.1. Identification et qualification des matériaux à traiter

Ces études sont à conduire dans le même esprit que celui défini au § B-1.3.1.a., mais leur complexité et leur volume devraient en général être moindre du fait que, pour ces applications, les aléas sur les quantités de produit de traitement sont en grande partie éliminés, car les dosages sont imposés par les valeurs de résistance à atteindre beaucoup plus que par l'état hydrique du matériau. En outre, les quantités de matériaux concernées sont généralement plus faibles, les matériaux plus localisés et donc plus homogènes.

Les études de qualification doivent permettre d'orienter l'étude de formulation sur le choix du (ou des) produit(s) de traitement adapté(s) à l'application envisagée. En particulier, elles impliquent quasi systématiquement la vérification de la compatibilité du sol avec le produit de traitement sur la base de l'essai d'aptitude d'un sol au traitement décrit dans la norme NF P 94-100 (cf. § C1-2.1.).

D'une manière générale, la fiabilité du traitement pour les applications envisagées est d'autant plus grande que l'état hydrique des matériaux concernés est situé entre moyen et humide. En particulier, lorsque l'état hydrique constaté à la mise en œuvre est sec et *a fortiori* très sec, il est prudent de renoncer au traitement si l'on n'a pas la garantie de pouvoir ramener le sol à l'état moyen, voire humide, par des dispositions éprouvées et réalistes pour le chantier considéré (cf. § C2-2.1.).

● 2.3.2. Étude de formulation

Elle doit être réalisée avec le (ou les) produit(s) de traitement défini(s), au terme de l'étude de qualification des matériaux, comme bien adapté(s) à l'application envisagée et doit aboutir à la détermination du dosage permettant d'atteindre le niveau de résistance recherché.

Son contenu est à définir en fonction du critère de performance jugé significatif pour l'application envisagée (cf. tab. B-VIII).

Dans le cas de l'application au raidissement des pentes de talus sans dispositions constructives particulières (coffrage provisoire, etc.), il peut être nécessaire d'étudier l'évolution de la prise afin de pouvoir définir l'âge au bout duquel le profilage du talus à sa pente définitive peut être réalisé (l'âge à viser étant celui pour lequel la prise est suffisante pour assurer la stabilité à court terme du talus (cf. § B-2.4.4.).

Pour l'ensemble de ces applications, le traitement n'exigera en général qu'un seul produit, mais il n'est pas exclu qu'il soit nécessaire de recourir à un traitement mixte (un liant hydraulique pour obtenir le niveau de résistance voulu, associé à de la chaux pour ajuster si nécessaire l'état hydrique du matériau).

Donc, dans le cas le plus général, l'étude de formulation devra donc produire :

- des abaques similaires à ceux présentés au § B-1.3.1.b. donnant les dosages en chaux vive à prévoir en fonction de l'état hydrique du matériau,
- des courbes d'évolution de la résistance en compression simple en fonction du dosage en produit de traitement et de l'âge du mélange.

● 2.3.3. Identification du produit de traitement

Les éléments sur ce point sont ceux donnés au § B-1.3.1.c.

■ 2.4. Matériels et techniques d'exécution

Les opérations de stockage et d'épandage des produits de traitement, lorsqu'elles sont nécessaires, sont réalisées de la même manière qu'indiqué aux § B-1.4.1. et B-1.4.2 pour chacune des applications considérées ici.

En outre, chacune de ces applications exigeant un respect assez rigoureux de l'état hydrique des mélanges pour garantir le niveau de performances mécaniques recherché, il faudra prévoir des moyens d'arrosage chaque fois que l'état hydrique du matériau naturel sera « sec » ou même « moyen ».

Enfin, des modalités particulières peuvent par ailleurs s'imposer, comme indiqué ci-après.

● 2.4.1. Amélioration de la partie supérieure des terrassements (PST)

Pour le malaxage en place, la règle générale est l'utilisation des gros pulvérisateurs de sols à arbre horizontal chaque fois que les caractéristiques du matériau (D_{max} notamment) autorisent leur emploi sans risques excessifs pour leur tenue mécanique. Si cela n'est pas le cas, des charrues peuvent être envisagées, mais il faut prévoir une augmentation de l'ordre de 50 % du nombre de passes par rapport à ce qui est habituel pour le traitement visant la réutilisation en remblai de sols trop humides.

Par ailleurs, l'épaisseur de matériau traité fixée dans le GTR étant au minimum de 0,30 m, le malaxage avec des charrues à disques se complique car il est alors nécessaire, pour les PST en déblai, de réaliser la mise en œuvre en deux couches avec application d'un mouvement de terre approprié [8] [10].

Les modalités de compactage restent en principe les mêmes que celles d'un corps de remblai (obtention d'une qualité q4).

● 2.4.2. Remblaiement des zones d'accès difficile

Le matériau doit être fabriqué, soit par traitement en place avec des gros pulvérisateurs de matériaux de déblai ou d'emprunt, soit en centrale, puis transporté à son lieu de mise en œuvre.

Le compactage doit, dans toute la mesure du possible, respecter les règles définies dans le GTR pour les engins lourds et moyens et dans le guide technique « Remblaiement des tranchées » pour les petits compacteurs.

L'ensemble des opérations de fabrication et de mise en œuvre doit être réalisé dans le délai de maniabilité du mélange, (cf. § C1-3.5).

● 2.4.3. Réalisation des parties basses des hauts remblais construits avec des matériaux sensibles à l'eau ou rocheux évolutifs

Pour cette application, l'ensemble des matériels et des techniques d'exécution développées pour la réutilisation de sols trop humides sont applicables.

● 2.4.4. Raidissement des pentes de talus de remblai

Le matériau doit être fabriqué, soit par traitement en place avec des gros pulvérisateurs, soit en centrale, puis transporté à son lieu de mise en œuvre. Des compacteurs à pieds dameurs peuvent avantageusement être utilisés pour obtenir une meilleure imbrication des couches élémentaires.

Lorsque la pente définitive du talus doit être acquise immédiatement, il est nécessaire de réaliser un soutènement provisoire pour assurer la stabilité du talus dans l'attente du développement de la prise hydraulique ou pouzzolanique ①.

Lorsque cette exigence n'est pas imposée, il est possible de réaliser l'ouvrage avec une pente garantissant sa stabilité avec les caractéristiques du matériau « avant prise » et de venir reprofiler le talus à un âge où la prise lui aura conféré des caractéristiques suffisantes pour assurer sa stabilité à sa pente définitive.

① En s'inspirant, par exemple, de certains dispositifs utilisés pour la construction de massifs de soutènement renforcés par des nappes géotextiles décrits dans la littérature.

■ 2.5. Assurance de la qualité

● 2.5.1. Formulation des stipulations

Les stipulations sont à définir soit dans le CCTP, soit dans le PAQ, en conformité avec les engagements du SOPAQ.

Leur formulation, qui pour l'essentiel peut s'inspirer des éléments donnés dans le tableau B-V, doit être complétée par des stipulations particulières telles qu'indiquées dans le tableau B-IX.

TABLEAU B-IX
Exemples de stipulations particulières pouvant être prescrites en fonction de l'application envisagée

Application envisagée	Stipulations particulières pouvant être prescrites
Amélioration de la PST	Épaisseur de la partie traitée Interdiction au trafic de chantier durant une période donnée (cf. § C-I-3.6.)
Remblaiement de zones d'accès difficile	Valeurs de compacité minimales exprimées en termes de taux de compactage
Partie basse des hauts remblais en matériaux sensibles	Hauteur de la partie traitée
Raidissement des pentes de talus	Mode de construction Atelier de compactage comportant des compacteurs à pieds

● 2.5.2. Actions de contrôle

Elles comprennent notamment :

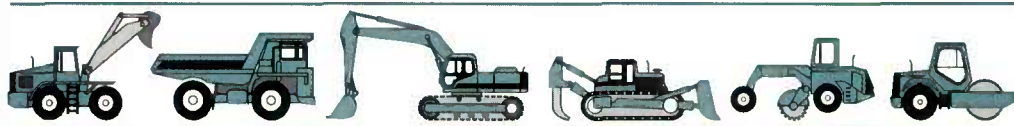
- la vérification de la conformité de la nature et de l'état des sols avec les hypothèses de l'étude,
- la vérification du respect des prescriptions relatives aux modalités d'exécution : technique de fabrication des mélanges, précision des épandeurs, types et caractéristiques des compacteurs, etc.,

et suivant les éléments du marché :

- soit la vérification de la conformité de la nature du produit de traitement utilisé et des quantités épandues,

► soit la vérification des performances obtenues avec le produit de traitement et le dosage définis dans l'étude de formulation.

La consistance pratique de ces actions est à définir principalement à partir des éléments donnés dans le § B-1.6.2. et les tableaux B-VI et B-VII, mais également en s'inspirant, autant que de besoin, des éléments donnés, pour les couches de forme, dans le tableau C3-IV.





Traitement des sols en couches de forme

Introduction

Partie C1 Études

Partie C2 Techniques et matériels d'exécution

Partie C3 Assurance de la qualité

Introduction

Le GTR, dans le paragraphe 5.2. du fascicule 1, considère qu'un sol, un matériau rocheux ou un sous-produit industriel sont aptes à constituer une couche de forme lorsqu'ils remplissent les quatre conditions suivantes :

- insensibilité à l'eau,
- granularité compatible avec les exigences de nivellement de la plate-forme,
- résistance vis-à-vis de la circulation de chantier,
- absence de gonflement sous l'effet du gel, le cas échéant.

Dans la réalité, on constate que seule une faible proportion des matériaux provenant des déblais ou des emprunts remplissent naturellement ces conditions. Pour les autres, il est nécessaire d'améliorer leur comportement par une technique appropriée et, en particulier, par un traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques.

Cette technique permet, en effet, de conférer à des matériaux qui, pour certains, ne seraient même pas utilisables en remblai, des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels traditionnellement réservés à la réalisation des couches de forme. Elle peut également être appliquée à ces derniers pour en élever les performances et optimiser le dimensionnement d'un projet particulier.

La technique du traitement pour la réalisation des couches de forme intéresse donc la majorité des sols et des matériaux rocheux.

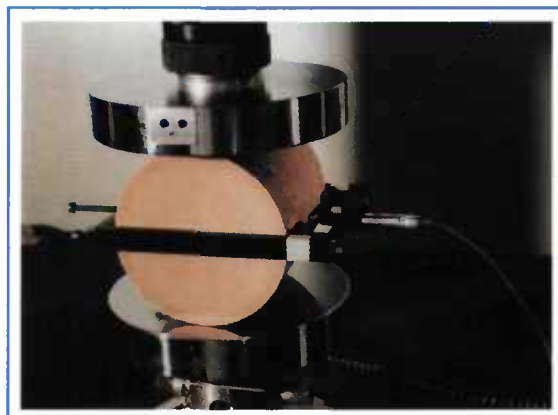
Il s'agit, cependant, d'une technique beaucoup plus délicate à maîtriser que celle traditionnelle utilisant des matériaux granulaires non traités. Elle s'exécute, en effet, selon des modalités plus nombreuses, plus complexes et plus contraignantes, aussi bien dans la phase « études » que dans la phase « travaux ». Enfin, si des défauts apparaissent, les actions correctives nécessaires sont presque toujours lourdes, ce qui justifie la mise en place d'un système d'assurance de la qualité également plus exigeant.

Cette troisième partie du guide technique reprend le même plan que la deuxième partie relative au traitement des sols en remblais. Toutefois, le nombre et la diversité des éléments qu'il est nécessaire de développer pour chacun des aspects :

- ❶ Études,
- ❷ Techniques et matériels d'exécution,
- ❸ Assurance de la qualité,

justifie qu'un chapitre particulier ait été consacré à chacun d'eux.

Études



1. Contexte général 93

- 1.1. Progressivité des études 93
- 1.2. Caractérisation d'un gisement 93

2. Méthodologie générale des études de formulation 97

- 2.1. Évaluation de l'aptitude du sol au traitement 97
- 2.2. Formulation applicable aux chantiers de faible importance 98
- 2.3. Étude de formulation à réaliser dans les autres cas de chantier 99

3. Étude de formulation de niveau 1 103

- 3.1. Objectif 103
- 3.2. Identification des composants du mélange 103
- 3.3. Choix des produits de traitement et des dosages 103
- 3.4. Caractéristiques de mise en œuvre des mélanges 104
- 3.5. Détermination du délai de maniabilité 105
- 3.6. Étude des performances mécaniques 106

4. Étude de formulation de niveau 2 110

- 4.1. Objectif 110
- 4.2. Consistance 110
- 4.3. Interprétation 112

5. Étude de formulation de niveau 3 113

- 5.1. Objectif 113
- 5.2. Consistance 113
- 5.3. Interprétation 114

Résumé

■ *Pour envisager l'utilisation d'un sol traité en couche de forme, il faut en premier lieu connaître, avec une précision suffisante, les plages de variation de ses principales caractéristiques géotechniques à l'intérieur du gisement prévu de réserver à cet usage.*

Pour ce faire, une reconnaissance géotechnique s'appuyant sur un nombre minimal de mesures, fonction du volume de matériau et du niveau de connaissance que l'on peut éventuellement en avoir a priori, est indispensable.

Si les plages de variation ainsi révélées dépassent certains seuils, il convient d'examiner si une technique de tri et/ou d'homogénéisation serait en mesure de les réduire pour satisfaire les seuils proposés.

■ *Une fois ce problème résolu, l'étude de formulation, permettant de choisir le produit de traitement le mieux adapté et de déterminer le dosage nécessaire pour atteindre les objectifs performanciers visés, peut être engagée.*

Toutefois pour les chantiers de faible importance, il peut s'avérer préférable de fixer a priori, d'après l'expérience, les dosages à appliquer plutôt que d'engager une étude de formulation compte tenu de son coût et de ses délais d'exécution. Dans cette situation, les dosages à retenir doivent cependant prendre en compte une certaine sécurité pour compenser l'absence d'étude.

Pour les autres chantiers, une étude de formulation s'impose. Son ampleur dépend de la plus ou moins grande participation de la couche de forme dans la structure de chaussée et de l'expérience déjà disponible sur le comportement du mélange considéré.

■ *Trois niveaux d'études de formulation, d'ampleur croissante, sont ainsi proposés.*

① *L'étude de formulation de niveau 1 correspond à une simple vérification que la formule, choisie a priori d'après l'expérience, permet d'atteindre le niveau de performances recherché à court et à long terme.*

② *Une étude de formulation de niveau 2 est à engager lorsque l'une au moins des conditions suivantes se présente :*

- *l'étude de niveau 1 n'a pas confirmé le niveau de performances escompté a priori,*
- *les interactions du matériau avec le produit de traitement ainsi que l'incidence des dispersions courantes d'exécution sur le comportement du mélange sont mal connues,*
- *une optimisation économique du dosage ainsi que du couple « classe mécanique du sol traité-épaisseur de la couche de forme » est recherchée.*

L'étude de formulation de niveau 2 est constituée d'une étude de niveau 1 à laquelle s'ajoute l'étude de l'incidence des facteurs d'influence que sont le dosage, la teneur en eau et la compacité, sur les performances du mélange.

③ *Enfin, une étude de niveau 3 est à réaliser lorsqu'un dimensionnement de l'ensemble « couche de forme-structure de chaussée » utilisant une méthode de calcul est envisagé. L'objectif est alors de déterminer, pour différentes formules, les caractéristiques mécaniques pouvant être introduites dans le modèle de calcul afin de retenir celle qui conduit à une optimisation technique et économique de la chaussée. Cette démarche est cependant réservée aux projets importants pour lesquels peuvent être satisfaites certaines conditions spécifiques et en particulier la possibilité de disposer d'études de reconnaissance détaillées, de délais suffisants pour les études de formulation et de moyens d'exécution performants. Il faut également que les actions d'assurance de la qualité permettent une validation claire des résultats de l'étude de formulation à partir, notamment, de mesures sur carottes et avoir prévu la possibilité éventuelle de correction du projet au vu des résultats obtenus.*

1. Contexte général

1.1. Progressivité des études

Les études appliquées à la réalisation de couches de forme en sols traités exigent des délais importants (de l'ordre d'un mois au minimum, du fait des temps de prise à respecter) [15]. Par ailleurs, leur volume, donc leur coût, est d'autant plus élevé qu'une plus grande participation de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée est recherchée et que l'on dispose de peu d'expérience sur le comportement du mélange sol-produit de traitement retenu (cf. § C1-2.). Pour éviter d'aboutir à des impasses (techniques, économiques, de délais, etc.) suite à des incertitudes sur certains points déterminants du projet, la plus grande attention doit être portée à la pertinence des questions qu'il convient de formuler à chaque stade d'avancement du projet. Les éléments habituellement considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement pour couche de forme sont indiqués dans le tableau C1-I. Lorsque la décision a été prise de réaliser une couche de forme en sol traité (en général au terme de l'étude d'avant-projet), il faut caractériser le gisement d'où seront extraits les matériaux réservés au traitement.

① Dans ce paragraphe, l'aspect principalement considéré est celui d'un gisement naturel (déblai ou emprunt), mais les éléments qui y sont développés sont applicables en quasi-totalité à l'ensemble des lieux d'origine d'où peuvent provenir les matériaux dont on veut étudier le traitement (dépôts, stocks, etc.).

1.2. Caractérisation d'un gisement ①

● 1.2.1. Objectif général

L'objectif général est de :

- définir, sur un profil géotechnique, le zonage de chaque formation et, à l'intérieur d'une zone, la plage de variation des paramètres de nature et d'état des sols comme représenté sur l'exemple de la figure C1-1,
- fournir un échantillon représentatif de chaque zone (ou d'un mélange de plusieurs zones) sur lequel les études de formulation (mesure des performances) pourront être réalisées.

● 1.2.2. Consistance minimale de la reconnaissance géotechnique permettant de caractériser un gisement

Le gisement retenu pour le traitement doit être caractérisé par un minimum d'essais d'identification géotechnique qui est fonction du volume de matériau nécessaire et du niveau de connaissance préalable de la formation considérée.

À défaut d'autres indications, on pourra évaluer ce minimum à partir des éléments du tableau C1-II.

● 1.2.3. Exploitation des données de la reconnaissance géotechnique

☛ a. Prise en compte de la dispersion

Pour chaque gisement, il faut établir l'histogramme des résultats des essais de nature et des teneurs en eau, et déterminer la moyenne m et l'écart type σ (ou l'étendue de la dispersion des mesures lorsque leur nombre est inférieur à 10). Lorsque la distribution présente une répartition multimodale, il convient de vérifier si un découpage de l'histogramme peut correspondre à un zonage simple et identifiable lors des travaux.

TABLEAU C1-1

Différents niveaux d'études géotechniques à engager dans le cas d'une couche de forme en sol traité

Niveau d'étude	Contenu de l'étude	Réponses attendues	Stade du projet habituellement concerné
0	<p>Collecte des données documentaires disponibles (cartes géologiques, fichiers d'éléments géotechniques et météorologiques, dossiers d'étude de chantiers comparables, etc.)</p> <p>Recueil de l'expertise locale (notamment concernant la présence possible d'éléments perturbateurs dans le sol et, dans l'affirmative, exécution de quelques essais d'évaluation de l'aptitude du sol au traitement envisagé)</p> <p>Analyse et synthèse de ces éléments dans la perspective du traitement de sol appliqué au projet de couche de forme envisagé</p>	<p>Possibilité technique d'envisager la réalisation de la couche de forme en sol traité (quantités de matériaux suffisantes et aptitude au traitement de ces matériaux)</p> <p>Mise en évidence de difficultés inhabituelles éventuelles pouvant mettre en cause la faisabilité du traitement sur le chantier considéré (possibilité de réaliser le malaxage en particulier)</p>	Étude préliminaire
1	<p>Caractérisation sommaire du gisement réservé à la couche de forme à partir des éléments de la reconnaissance géologique et géotechnique générale du tracé</p> <p>Si nécessaire, exécution de quelques sondages (tarière, pelle, etc.) complémentaires pour une caractérisation plus fine du gisement</p> <p>Sur les chantiers importants, exécution d'une étude de formulation sommaire sur 1 (éventuellement 2 ou 3) échantillons représentatifs du (ou des) gisement(s) réservé(s) pour la couche de forme</p> <p>Établissement d'une synthèse de l'ensemble de ces éléments</p>	<p>Confirmation de l'aptitude au traitement du sol situé dans le gisement réservé à la couche de forme</p> <p>Évaluation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des volumes de sol utilisables probables - des techniques et des matériels d'exécution utilisables - du (ou des) produit(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) et des quantités nécessaires probables <p>avec une précision admissible pour établir un prédimensionnement (technique, économique, délais d'exécution) de la solution</p>	Avant-projet
2	<p>Finalisation de la caractérisation du gisement conformément aux indications données au § C1-2</p> <p>Pour chaque gisement, constitution d'échantillons représentatifs (du sol moyen et des sols extrêmes)</p> <p>Identification, si nécessaire, du produit de traitement utilisé dans l'étude</p> <p>Pour les projets le justifiant (cf. § C1-2), exécution d'une étude de formulation du niveau requis, sur les échantillons représentatifs de chaque gisement, afin de préciser les dosages à appliquer en fonction des performances recherchées et, le cas échéant, des états hydriques prévisibles (une partie plus ou moins importante de ces études de formulation peut être reportée au niveau des études d'exécution réalisées en cours de travaux si les délais de réponse de l'étude le permettent)</p>	<p>Établissement des règles régissant les dosages à appliquer en fonction de la nature et de l'état des sols et du niveau des performances mécaniques visé</p> <p>Caractérisation et localisation des gisements sur le profil en long géotechnique</p> <p>Éléments sur les matériels et les méthodes d'exécution les mieux adaptés techniquement</p>	Projet
3	<p>Organisation et conduite d'un chantier expérimental, par exemple, pour valider :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le dimensionnement de l'ensemble couche de forme-chaussée lorsqu'il résulte d'une méthode de calcul s'appuyant sur des performances déterminées en laboratoire. Dans ce cas, le chantier expérimental comportera, en plus des mesures et constatations courantes pour un chantier de couche de forme en sol traité, des mesures de performances mécaniques sur carottes et/ou des mesures d'ovalisation - l'utilisation de produit(s) de traitement innovant(s) pour lesquels on ne dispose pas d'expérience (identification du (ou de ces) produit(s), mesure sur carottes ou par ovalisation des performances atteintes, etc.) - l'emploi de matériels et de techniques d'exécution particulières (traitement en centrale, compacteurs d'un type particulier, etc.) - expérimentation de techniques d'exécution non confirmées ou de matériels mal connus - le choix de la solution « traitement » sur certains sols de comportement mal connus (par exemple : matériaux rocheux évolutifs, sols très argileux, sols à probabilité de teneurs en éléments perturbateurs, etc.) - etc. 	<p>Ce niveau d'étude est spécifique aux projets pour lesquels les études de niveau inférieur n'ont pas répondu avec la précision souhaitée aux interrogations relatives à la faisabilité du traitement et au niveau de prise en compte de la couche de forme traitée dans le dimensionnement de la chaussée alors que ces aspects sont déterminants pour le projet</p>	<p>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 *</p>

* 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

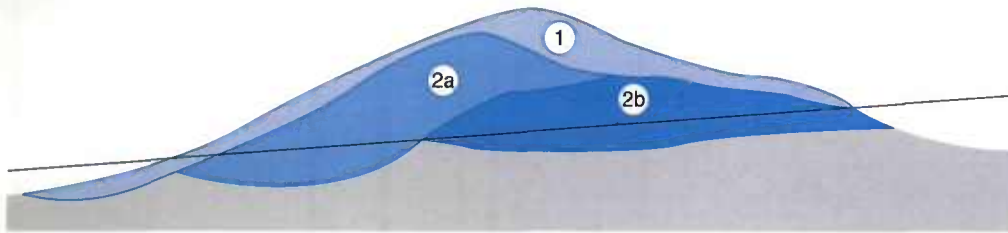


Figure C1-1.
Exemple de présentation d'un profil en long géotechnique renseigné pour une étude de traitement de sol pour couche de forme.

Zonage du gisement	1			2a			2b		
Formation géologique	Limons éoliens			Argiles marneuses			Argiles marneuses		
Volume estimé	120 000 m ³			50 000 m ³			40 000 m ³		
VB _s (g)	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	1,65	18 %	16	-	-	-	-	-	-
I _p	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	-	-	-	18	33 %	12	25	40 %	6
w _n (%)	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	16	25 %	40	19	10,5 %	18	26	34,5 %	12
w _{OPN} (%)	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	16	12,5 %	12	18	17 %	8	24	21 %	6
ρ _{dOPN} (g/cm ³)	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	1,76	4,5 %	12	1,72	7 %	8	1,66	8,5 %	6
IPI à w _n	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures	Moyen	Dispersion *	Nombre de mesures
	14	57 %	12	8	62,5 %	8	5	80 %	6
Classe GTR	A1			A2			A2-A3		

* La dispersion est exprimée par le rapport entre l'étendue des mesures, si leur nombre N est ≤ 10 (ou à deux fois l'écart type si N > 10), et la moyenne de ces mesures

TABLEAU C1-II
Nombre minimal d'essais nécessaires pour caractériser un gisement

Volume (V) de couche de forme à réaliser (m ³)	Essais d'identification géotechnique	Formation connue et supposée homogène ◇	Formation connue et supposée moyennement homogène ◇	Formation inconnue
V < 10 ⁴	Nature *	1	3	9
	État hydrique ☉	2	4	16
10 ⁴ < V < 10 ⁵	Nature *	V / 10 ⁴	3V / 10 ⁴	9V / 10 ⁴
	État hydrique ☉	2V / 10 ⁴	4V / 10 ⁴	16V / 10 ⁴
V > 10 ⁵	Nature *	10	30	90
	État hydrique ☉	20	40	160

* Les essais concernés ici sont ceux permettant de classer le sol suivant sa nature selon la classification de la norme NF P 11-300

☉ Principalement évalué à partir de mesures de la teneur en eau naturelle supposées représentatives de la saison des travaux. Si la période de travaux n'est pas connue et que ce facteur est influent (dans le cas de gisement à faible profondeur ou influencé par les fluctuations annuelles d'une nappe, par exemple), une réflexion appuyée autant que possible sur des mesures ou des constatations est nécessaire pour estimer, sur un cycle annuel, les états hydriques extrêmes possibles

◇ Cette appréciation suppose être donnée par un géotechnicien ayant une bonne connaissance des formations locales

① La dispersion des valeurs de la ρ_{dOPN} est déterminée à partir :

- soit d'un essai « Proctor Normal » réalisé sur chaque échantillon prélevé lors de la reconnaissance du gisement. Le nombre de ces échantillons doit alors être suffisant pour garantir la représentativité du gisement ;
- soit d'une corrélation existant entre la ρ_{dOPN} et un paramètre d'identification des sols (ou une combinaison de plusieurs) choisi(s) pour la facilité de leur saisie, tels que l'IP, la V_{BS} , l'ES et/ou quelques seuils granulométriques. Cette corrélation peut être admise par expérience ou établie spécifiquement pour le cas considéré ;
- soit des résultats des essais d'identification (voire des observations visuelles et tactiles) réalisés lors de la reconnaissance géotechnique pour localiser la présence éventuelle dans le gisement de familles de matériaux différentes et en effectuant, pour chaque famille, un essai « Proctor Normal » sur les échantillons qui apparaissent être les extrêmes au vu des résultats de ces essais d'identification ou de ces observations.

Dans l'affirmative, le gisement est découpé en zones et on affecte à chaque zone la moyenne et la dispersion de chaque paramètre. Dans le cas contraire, on considère le gisement comme une seule zone à laquelle sont affectées les valeurs m et σ de l'ensemble de l'histogramme.

Un certain nombre d'échantillons est ensuite prélevé dans la (ou les) zone(s) ainsi identifiée(s) (entre trois et dix suivant l'importance et l'hétérogénéité supposée des sols englobés dans la zone). Chaque prélèvement doit représenter une quantité suffisante pour réaliser une étude Proctor Normal.

b. Mode de présentation des résultats

Le zonage des familles de sols est représenté sur un profil en long dans le cas des sols situés dans les déblais du tracé, ou à partir d'une cartographie assortie de coupes géotechniques dans le cas d'un emprunt. Chaque zone est repérée et renseignée comme indiqué sur l'exemple de la figure C1-1.

1.2.4. Constitution des échantillons représentatifs

Avant de constituer l'échantillon représentatif destiné à l'étude de traitement, il convient d'évaluer l'homogénéité du matériau situé dans le gisement retenu pour le traitement. Pour ce faire, on détermine la dispersion des valeurs de la ρ_{dOPN} mesurées sur les différents prélèvements réalisés dans ce gisement ①. Le tableau C1-III précise, en fonction des niveaux de dispersions observés, les utilisations possibles du matériau traité.

TABLEAU C1-III
Utilisations possibles des sols traités en couche de forme en fonction de leur homogénéité

Dispersion de la ρ_{dOPN} *	Utilisations possibles du matériau traité
≤ 4 %	Niveau d'homogénéité excellent mais qu'il n'est pas justifié, sauf exception, d'exiger pour une couche de forme
≤ 6 %	Matériau homogène pouvant être utilisé après traitement dans tous types de couches de forme et notamment dans les structures « couches de forme-assises de chaussées » dimensionnées selon un modèle de calcul (cf. § C1-5.)
≤ 8 %	Matériau moyennement homogène pouvant être utilisé dans la majorité des couches de forme en sol traité, à l'exception du cas évoqué ci-dessus
≤ 10 %	Matériau relativement hétérogène dont l'emploi en couche de forme traitée est à réserver aux chantiers moyens et petits dans lesquels la classe de plate-forme est limitée à PF ₃ (cf. § C1-4.)

* La dispersion est exprimée par le rapport entre l'étendue des mesures, si leur nombre N est ≤ 10 (ou à deux fois l'écart type si $N > 10$), et la moyenne de ces mesures

Lorsque pour l'utilisation envisagée, la plage de dispersion de la ρ_{dOPN} observée est inférieure à ces valeurs, l'homogénéité du gisement est donc satisfaisante, et on peut alors considérer que le mélange des prélèvements réalisés sur l'ensemble du gisement constitue un échantillon représentatif utilisable pour l'étude.

Si cela n'est pas le cas, mais que l'on estime qu'une homogénéisation par une technique éprouvée (cf. § C2-2.1.) est réalisable et permettra de ramener les dispersions dans les tolérances précitées, on considérera que l'on se retrouve dans le cas précédent. S'il apparaît plutôt qu'un tri à l'exécution s'avère mieux adapté, il conviendra de prélever un échantillon représentatif de chaque formation supposée obtenue après tri (et/ou élimination, le cas échéant, des fractions que le tri sera censé écarter).

Dans les autres situations, il faut examiner si un complément de reconnaissance géotechnique ne permettrait pas d'affiner le zonage de manière à définir une nouvelle localisation des matériaux satisfaisant les conditions d'homogénéité recherchées ❶. Dans la négative, l'abandon de la solution « traitement » est à envisager.

❶ Cette localisation doit cependant être aisément repérable lors de l'exécution des travaux (dans toute la mesure du possible par simple observation visuelle).

❷ Le cas échéant, les raisons pouvant justifier de se passer de cette vérification doivent être présentées.

❸ Certains liants hydrauliques tels que les ciments CLK/CEM III/C, les ciments PM pour travaux à la mer ou pour ouvrages en contact avec des eaux séléneuses (ciment ES) (cf. annexe 2) peuvent être envisagés mais, dans tous les cas, une vérification s'impose

2. Méthodologie générale des études de formulation

2.1. Évaluation de l'aptitude du sol au traitement

Dans l'application du traitement à la réalisation de couche de forme, la vérification de l'aptitude du sol au traitement est à réaliser quasi systématiquement [24] [36] et ce à une phase d'élaboration du projet d'autant plus en amont que des doutes sur ce point sont possibles (cf. tab. C1-I) ❷. Elle se fait à partir de l'essai décrit dans la norme NF P 94-100 (cf. § A-1.1.1.). Les résultats de l'essai s'interprètent comme indiqué dans le tableau C1-IV.

TABLEAU C1-IV
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_{td} (MPa)
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	$0,1 \leq R_{td} \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$
Traitement à la chaux seule	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique *
	Inadapté	≥ 10	

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

Dans les cas désignés comme « inadapté »

La technique du traitement est en principe à abandonner (sauf à choisir un liant spécifique ❸ ou à modifier le sol par un traitement approprié tel qu'un prétraitement à la chaux, par exemple).

Dans les cas désignés comme « douteux »

La décision de persévérer dans la solution « traitement » dépend du contexte particulier du chantier.

Les valeurs proposées dans ce tableau sont issues d'une expérience récente et pourront être ajustées à l'avenir au vu des éléments apportés par la généralisation de la pratique de l'essai.

Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques



Détail des deux éprouvettes. L'éprouvette de gauche conservée dans son conteneur en acier est destinée à l'évaluation du bon déroulement de la prise hydraulique. L'éprouvette confinée dans la grille textile est destinée à la mesure du gonflement volumique.



Les deux éprouvettes placées dans le bain thermostaté.



■ 2.2. Formulation applicable aux chantiers de faible importance

Pour ces chantiers, le coût et le délai d'une étude de formulation sont souvent prohibitifs. Il est, néanmoins, possible de ne pas renoncer à la solution traitement de sol en fixant empiriquement le type de produit de traitement et son dosage en fonction de la classe de sol, comme indiqué dans le tableau C1-V.

La décision de caractériser un chantier comme « de faible importance » appartient au projeteur mais, *a priori*, on peut considérer que cela sera le cas lorsque les conditions suivantes seront réunies :

- le volume de la couche de forme est inférieur à 5 000 m³,
- les sollicitations appliquées à la plate-forme support de chaussée sont d'un niveau courant, excluant notamment son utilisation en tant que piste de chantier pour écouler un trafic supérieur à celui généré par l'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation,
- la prise en compte de la couche de forme dans un surclassement de plate-forme et, *a fortiori*, son intégration dans le dimensionnement de la chaussée par une méthode de calcul ne sont pas envisagées,
- l'utilisation d'un liant spécial routier (LSR) n'est pas envisagée (sauf à disposer d'une expérience confirmée du comportement du même LSR sur un sol pouvant être considéré comme très similaire),
- les sols concernés ne se trouvent pas dans des états hydriques extrêmes (« ts » ou « th »).

TABLEAU C1-V
Modalités de traitement envisageables pour les chantiers de faible importance

Classes de sols	Modalités de traitement
A ₁ *, B ₅ * C ₁ A ₁ *, C ₁ B ₅ * C ₂ A ₁ *, C ₂ B ₅ *	1 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₂ , B ₆ C ₁ A ₂ , C ₁ B ₆ C ₂ A ₂ , C ₂ B ₆	1,5 % CaO + 7 % C _{32,5}
A ₃ , C ₁ A ₃ , C ₂ A ₃	2 % CaO + 7 % C _{32,5} ou 6 % CaO
B ₁ , B ₂ , D ₁ C ₁ B ₁ , C ₁ B ₂	6 % C _{32,5} + correcteur éventuel ②
B ₃ , B ₄ , D ₂ , D ₃ C ₁ B ₃ , C ₁ B ₄ C ₂ B ₃ , C ₂ B ₄	5 % C _{32,5}
Autres matériaux	À définir sur la base d'une étude de niveau 1 au minimum

* Dans le cas où ces matériaux sont peu argileux ($VB_s < 0,5$), le traitement à la chaux n'est pas indispensable

② Le choix de la nature et du dosage du correcteur éventuel doit tenir compte de l'expérience locale

Les modalités proposées dans le tableau C1-V :

- prennent en compte un coefficient de sécurité sur les dosages du fait de l'absence d'étude spécifique,
- sont établies pour des liants normalisés : chaux vive et ciment de la classe CPJ CEM II/A 32,5 ① ou CPJ CEM II/B 32,5 ① (ce ciment est noté C_{32,5} dans le tableau C1-V). Les dosages proposés s'entendent rapportés au matériau 0/D_{max}, sauf dans le cas du traitement à la chaux seule pour lequel ce dosage est rapporté à la fraction 0/400 μm ②. Lorsqu'un LSR est envisagé, les dosages seront à reprendre directement des exemples de chantiers présentés comme justification,
- sont définies pour permettre de retenir les épaisseurs de couche de forme préconisées dans les tableaux de l'annexe 3 du fascicule 2 du GTR (sans application des règles de surclassement),
- supposent que l'état hydrique des mélanges permettra une mise en œuvre correcte (cf. § C1-3.4.) et qu'il n'y a pas de risque significatif de pénétration du gel ni d'immersion au jeune âge (au cours des 60 jours suivant la mise en œuvre du sol traité).

■ 2.3. Étude de formulation à réaliser dans les autres cas de chantier

Pour les chantiers ne pouvant être considérés comme de faible importance au sens défini précédemment, une étude de formulation s'impose et s'exécute comme suit.

● 2.3.1. Dimensions et modalités de confection des éprouvettes

La dimension des éprouvettes dépend du D_{max} du matériau et du type d'essai de résistance auquel elles sont soumises.

Le mélange du sol avec le (ou les) produit(s) de traitement est réalisé conformément à la norme NF P 94-230-3 pour les sols non ou très peu argileux (classes B₁, B₂, B₃, B₄, D₁, D₂, etc.) et pour les autres, selon les modalités décrites dans la norme NF P 98-093 (en utilisant notamment le malaxeur-désagrégateur décrit dans l'annexe informative de cette norme cf. § B-1.3.1.b.).

① Désignation conforme à la norme NF P 15-301 de 1994 (cf. annexe 2).

② Cette fraction correspond, en général, à la totalité du sol dans le cas des sols de la classe A₃, mais cela n'est plus le cas pour les sols C₁A₃ et C₂A₃. Pour ces classes, il convient d'estimer au moins approximativement la proportion de la fraction 0/400 μm et de corriger en conséquence la valeur de 6 % donnée dans le tableau C1-V (sous peine de conduire à un surdosage qui, dans le cas de la chaux, ne va pas dans le sens d'un accroissement des caractéristiques mécaniques).

① Cette simplification suppose que les fractions $20/D_{\max}$ et $0/20$ fixent, en fonction de leurs masses respectives, la même quantité de produit de traitement, ce qui est forcément inexact étant donné leur différence de surface spécifique. Elle est néanmoins acceptable en première approximation car elle est sécuritaire (puisqu'elle conduisant à un enrichissement en produit de traitement de la fraction $0/20$ mm proportionnel au rapport entre les surfaces spécifiques de la fraction totale $0/D_{\max}$ et de la fraction $0/20$ mm). Des études sont cependant en cours pour évaluer plus objectivement les effets de cette simplification.

Les différents essais de résistance utilisés dans les études de formulation sont choisis parmi les suivants [22] :

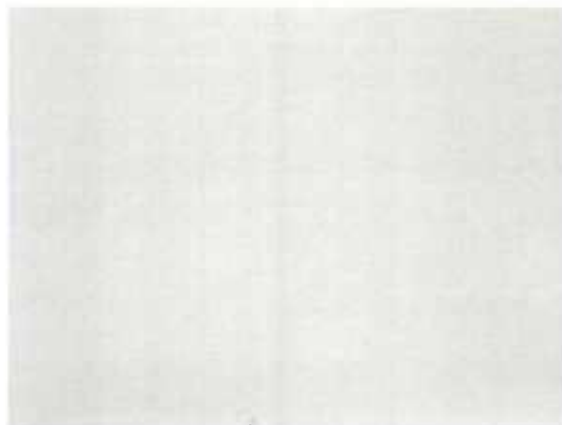
- les essais de résistance au poinçonnement (I_{CBR} après 4 j d'immersion et IPI), cf. norme NF P 94-078,
- l'essai de compression simple (R_c), cf. norme NF P 98-232-1,
- l'essai de compression diamétrale (R_{td}), cf. norme NF P 98-232-3,
- l'essai de traction directe (R_t), cf. norme NF P 98-232-2.

Pour la détermination des indices : I_{CBR} après 4 j d'immersion et IPI, la fraction granulaire soumise à l'essai, les dimensions des éprouvettes et leurs modalités de confection sont définies dans les normes NF P 94-078 et NF P 94-093.

Pour la détermination des résistances R_c , R_{td} , R_t , la fraction granulaire à soumettre aux essais et le diamètre minimal des éprouvettes à confectionner sont indiquées dans le tableau C1-VI. Les valeurs proposées représentent un compromis entre l'aspect pratique de l'étude et la possibilité de transposition des résultats au chantier. Les modalités de compactage (statique ou vibro-compression) sont détaillées dans les normes NF P 94-230-1 et NF P 94-230-2.

Lorsque le matériau comporte une fraction granulaire $20/D_{\max}$, l'étude est réalisée sur la fraction $0/20$ mm et, à défaut d'autres éléments (planches d'essais, expérience de chantiers similaires, etc.), ses résultats sont appliqués à la fraction totale $0/D_{\max}$ ①.

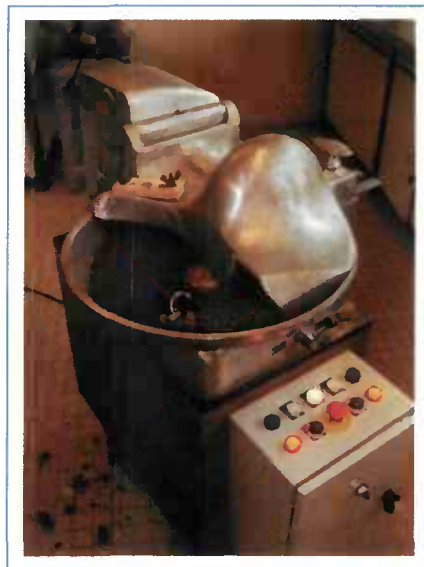
Les valeurs d'élancement et les compacités à retenir sont indiquées dans le tableau C1-VII. Elles tiennent compte du type d'essai mécanique réalisé.



Malaxeur désagrégateur spécifique à la fabrication des mélanges de sols cohérents avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques



Détail du malaxeur. À remarquer : le bol avec les mottes de sol et la chaux pulvérisée au-dessus, le carter supérieur (en position levée) et le couteau de malaxage fixé sur son arbre et, sous le bâti, son moteur d'entraînement à vitesse variable.



Détail du mélange obtenu. Après quelques secondes de malaxage, le mélange se présente sous la forme d'une mouture de teinte parfaitement homogène et d'une « granularité » 0/5 millimètres.

TABLEAU C1-VI
Fractions granulaires et diamètres minimaux des éprouvettes soumises
aux essais de résistances mécaniques R_c , R_t , R_{tb}

Matériaux	Fraction granulaire soumise à l'essai (mm)	Diamètre minimal de l'éprouvette (cm)
A ₁ , B ₁ , B ₂ , D ₁	0/6	5
B ₃ , B ₄ , D ₂ , D ₃	0/20	10
B ₅ , B ₆		
Passant à 2 mm ≥ 70 %	0/6	5
Passant à 2 mm < 70 %	0/20	10
Ci A _i , Ci B _i	0/20	10
Autres matériaux	0/6 si D ₉₅ < 6 mm 0/20 si D ₉₅ ≥ 6 mm	5 si D ₉₅ < 6 mm 10 si D ₉₅ ≥ 6 mm

TABLEAU C1-VII
Modalités de confection des éprouvettes en fonction du type d'essai réalisé

Type d'essai	Élancement	Compacité	Mode de compactage
Résistance en compression simple (R_c)	2	98,5 % $p_{d_{OPN}}$	Vibro-compression ou compactage statique
Résistance en compression diamétrale (R_{tb})	1	96 % $p_{d_{OPN}}$	Vibro-compression * ou compactage statique
Résistance en traction directe (R_t) ☉	Géométrie définie par la norme NF P 98-230-1	96 % $p_{d_{OPN}}$	Vibro-compression

* Le mode de compactage par vibro-compression pour le moulage d'éprouvettes d'élancement 1 n'est pas explicitement envisagé dans la norme NF P 94-230-1, mais il peut cependant être utilisé moyennant une adaptation de l'appareillage décrit dans cette norme (intercalation, au moment du moulage, de deux cales de dimensions ad hoc sur chaque piston)

☉ Cet essai s'applique principalement aux sols dont le D₅₀ excède 2 mm (sans exclure pour autant l'essai R_{tb}).

● 2.3.2. Les différents niveaux d'études de formulation

Le niveau de l'étude de formulation adapté à un chantier donné se définit principalement à partir des facteurs suivants :

- le mode de prise en compte de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée,
- le niveau d'expérience acquis sur des chantiers similaires,
- l'intérêt économique d'une optimisation du dosage.

Suivant les réponses pouvant être apportées à chacun de ces facteurs, on est conduit à engager une étude de formulation de niveau 1, 2 ou 3 comme indiqué dans le diagramme représenté sur la figure C1-2.

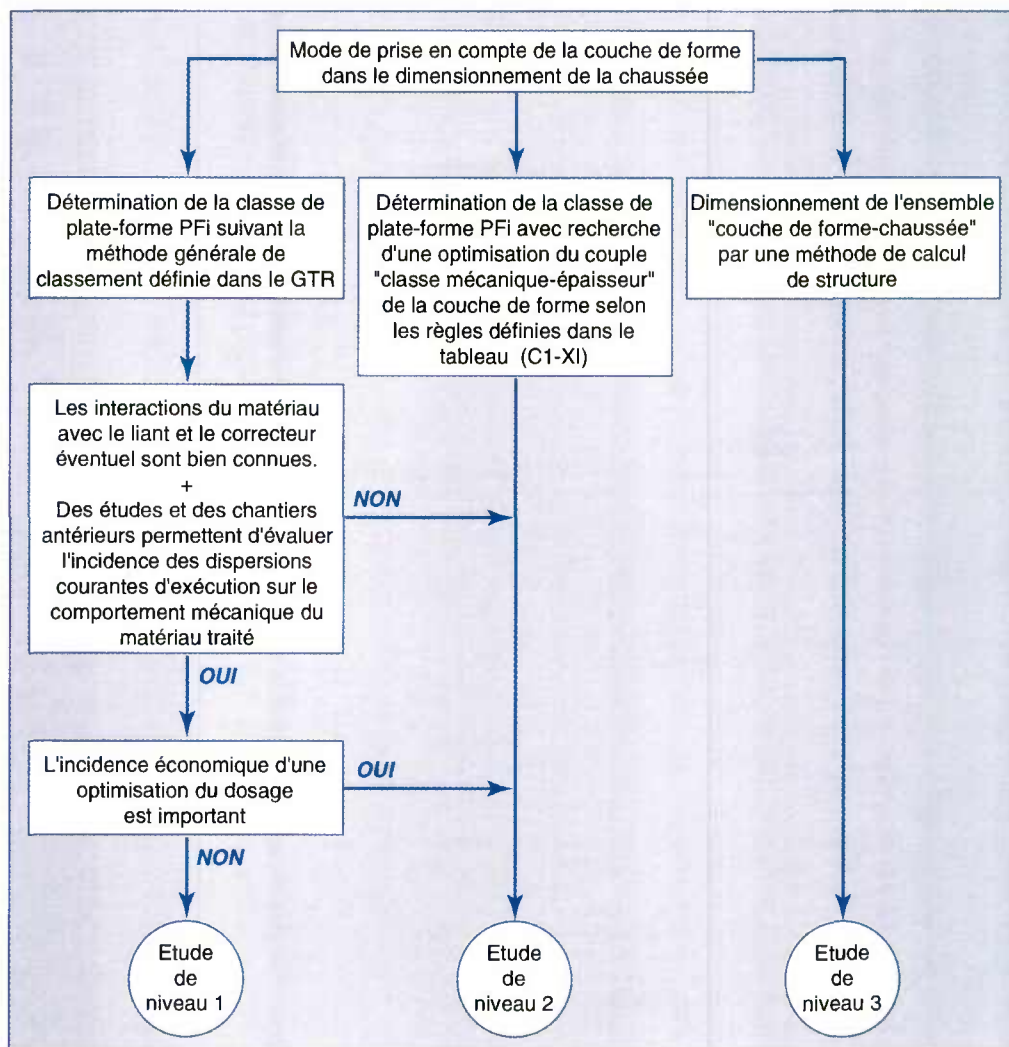


Figure C1-2. Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager.

3. Étude de formulation de niveau 1

■ 3.1. Objectif

L'objectif d'une étude de formulation de niveau 1 est de vérifier que, pour la formule choisie *a priori* d'après l'expérience (appelée « formule de base »), les performances indiquées au § C1-3.6. sont obtenues ①

Si les performances visées ne sont pas atteintes, il faut en conclure que l'expérience ayant fixé le choix de la formule de base n'était pas suffisante et il faut alors engager une étude de niveau 2.

■ 3.2. Identification des composants du mélange

L'échantillon représentatif du sol à traiter est préparé selon les modalités définies au § C1-1.4. et identifié selon les paramètres de nature et d'état hydrique utilisés pour le classement du sol selon la norme NF P 11-300, complétés, si justifié, par la mesure de la fragmentabilité et de l'abrasivité (cf. § A-1.1.).

La chaux et/ou le ciment sont identifiés et évalués sur la base des critères définis dans les normes correspondantes. Pour les LSR, l'identification est établie sur la base des caractéristiques principales figurant dans l'avis technique ou, à défaut, dans la fiche technique du producteur (cf. § A-1.2. et A-1.3.).

L'eau introduite doit satisfaire la norme NF P 98-100 type 1 (ou type 2, après justification par une étude spécifique) (cf. § A-1.3.).

■ 3.3. Choix des produits de traitement et des dosages

Il est fait d'après l'expérience du comportement du sol avec les produits de traitement utilisés localement. Dans le cas des études de formulation réalisées pour définir la solution de base soumise à l'appel d'offres, il convient d'utiliser des produits normalisés (chaux, ciments). L'étude avec un LSR peut toutefois être engagée si, dans le contexte du chantier, il s'avère que ce produit présente une forte probabilité d'être utilisé. Si plusieurs liants risquent de se trouver en concurrence, il peut être justifié de réaliser simultanément une étude pour chacun d'eux.

On rappelle, par ailleurs (cf. § A-3.2.2.), que le dosage en produit(s) de traitement est exprimé par le rapport entre la masse de produit de traitement et la masse des constituants solides du mélange (y compris le produit de traitement).

① Lorsque le traitement envisagé est un traitement mixte (chaux + liant hydraulique), la formule de base considérée doit fixer à la fois le dosage en chaux et celui du liant. S'il s'avère que le dosage en chaux risque de varier sensiblement (> deux points de chaux) en cours de chantier pour corriger l'état hydrique du sol, il est recommandé d'engager une étude de niveau 1 pour les valeurs minimales et maximales des dosages en chaux pouvant éventuellement être appliquées.

■ 3.4. Caractéristiques de mise en oeuvre des mélanges

❶ En l'absence d'une telle étude, on peut admettre en première approximation que plus la fraction fine présente dans le matériau est faible et peu plastique, plus l'IPI minimal requis sera élevé. Ainsi par exemple, il est justifié d'exiger une valeur d'IPI supérieure ou égale à 30 dans le cas d'une grave C₁B₄.

Il s'agit d'estimer le comportement du matériau lors de sa mise en oeuvre et de déterminer les références de compactage (w_{OPN} et $\rho_{d_{OPN}}$) du sol traité.

Pour ce faire, on établit les courbes Proctor Normal du sol avant et après traitement ainsi que la courbe IPI du sol traité (cf. normes NF P 94-093 et NF P 94-078).

L'étude est réalisée sur des échantillons provenant de quartages de l'échantillon représentatif, préparés à cinq teneurs en eau au moins, notées $w_{i1} \dots w_{i5}$, incluant la fourchette des teneurs en eau naturelles w_n représentatives de la saison des travaux, comme représenté sur la figure C1-3.

Ces échantillons sont mélangés avec les produits de traitement aux dosages définis précédemment, selon les modalités décrites dans la norme NF P 94-093.

Après avoir réalisé le compactage Proctor et l'essai de poinçonnement immédiat, la teneur en eau finale w_i et la masse volumique apparente sèche de chaque éprouvette sont déterminées.

Les résultats de l'étude sont présentés comme indiqué sur la figure C1-3.

Les caractéristiques de mise en oeuvre des mélanges à respecter sur le chantier doivent satisfaire les deux conditions suivantes.

❑ L'indice portant immédiat (IPI)

mesuré sur le sol traité issu de l'échantillon préparé à $w_i = w_{max}$ de la fourchette des w_{nat} doit être au moins égal à la valeur IPI donnée dans le tableau C1-VIII. Sur l'exemple de la figure C1-3, l'IPI à considérer est celui correspondant à w_{i4} après traitement.

TABLEAU C1-VIII
Indice portant immédiat (IPI) minimal à obtenir à la mise en oeuvre

Classes de matériaux	IPI minimal
A ₃ - C ₁ A ₃	10
A ₂ - C ₁ A ₂ - B ₆ - C ₁ B ₆	15
A ₁ - B ₅ - C ₁ A ₁ - C ₁ B ₅	20
Autres classes	à fixer d'après l'expérience ou à déterminer à l'appui d'une étude spécifique ❶

❑ La teneur en eau finale (w_i)

du sol traité issu de l'échantillon préparé à $w_i = w_{min}$ de la fourchette des w_{nat} doit être supérieure ou égale à $0,9 w_{OPN}$ du sol traité. Sur l'exemple de la figure C1-3, c'est le cas pour les valeurs de w_n supérieures ou égales à w_{i2} car, après traitement, w_{i2} devient w_{f2} ($> 0,9 w_{OPN}$).

Si la plage des w_n prévisible à l'exécution ne permet pas de satisfaire ces conditions pour une part importante du sol à traiter, il convient d'envisager la nécessité de procéder soit à une humidification du matériau dans sa masse, soit inversement à une aération ou un traitement à la chaux vive (ou à une élévation du dosage en chaux dans le cas d'un traitement mixte). Ces éventualités devront être évaluées aux plans technique et économique ; elles peuvent conduire à l'abandon de la solution du traitement.

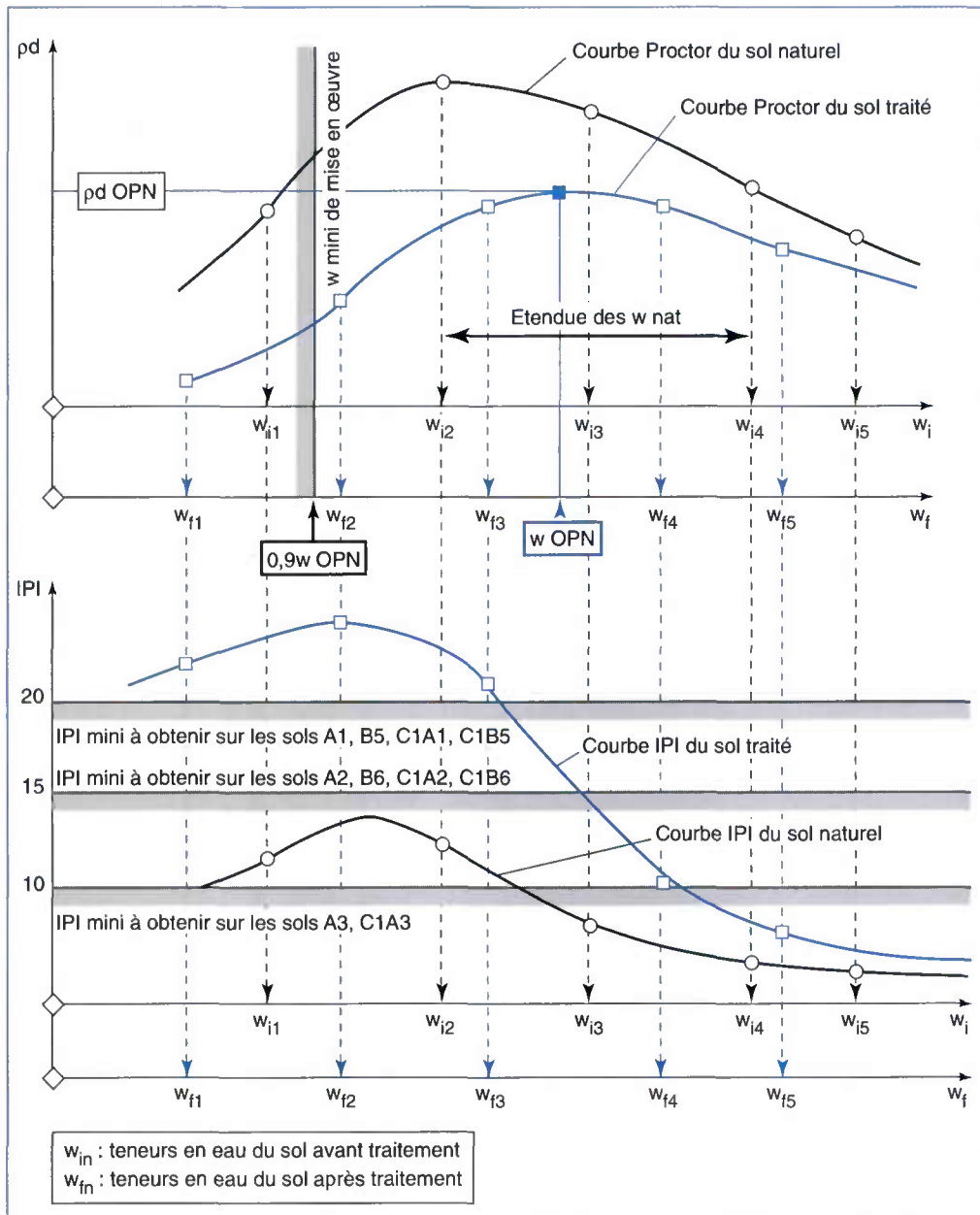


Figure C1-3.

Exemple de représentation d'une étude Proctor Normal-IPI à réaliser pour la détermination des caractéristiques de mise en œuvre des sols traités pour couche de forme (cas d'un sol A₂ traité à 1 % de CaO + 4 % CPJ-CEM II/A 32,5).

■ 3.5. Détermination du délai de maniabilité

Lorsque le traitement des sols est réalisé avec un liant hydraulique, il importe qu'un certain nombre d'opérations élémentaires de mise en œuvre soient réalisées dans le délai de maniabilité (cf. § C2-1.).

Si l'expérience disponible ne permet pas d'évaluer ce délai avec la précision nécessaire (au moins à une heure près en général), il doit être déterminé spécialement pour le mélange considéré et, pour au moins, deux températures encadrant les températures prévisibles de l'époque de réalisation des travaux. Le délai de maniabilité à respecter à la température constatée sur le chantier pourra alors être interpolé entre les deux valeurs ainsi trouvées.

① La norme NF 98-231 prévoit deux méthodes de détermination du délai de maniabilité : la méthode A repose sur la mesure de l'évolution en fonction du temps de la pd_{OPN} du mélange et la méthode B sur la variation en fonction du temps de la célérité d'ondes soniques. Les résultats entre ces deux méthodes n'étant pas en parfaite corrélation, il y a lieu, pour un cas de chantier donné, de fixer la méthode qui devra être utilisée.

② À déterminer à partir des données statistiques des services de la Météorologie nationale [38], [39] et [40].
À défaut et en première approche, on pourra s'inspirer des éléments présentés dans la note technique LCPC « Engazonnement des emprises routières - Détermination des périodes d'interdiction d'engazonnement » (octobre 1974).

La détermination du délai de maniabilité est réalisée selon la méthodologie décrite dans la norme NF P 98-231, parties 5 et 6 ①.

Pour la majorité des chantiers, une valeur de quatre à six heures est satisfaisante, mais des valeurs plus élevées peuvent être recherchées, si des conditions d'organisation de chantier particulières les justifient.

■ 3.6. Étude des performances mécaniques

● 3.6.1. Traitement à la chaux seule

Actuellement, ce type de traitement n'est à envisager que pour les sols fins moyennement à fortement argileux ($I_p > 20$) et dans les régions non ou peu concernées par le gel. Par ailleurs, l'expérience actuelle n'autorise pas, avec ce type de traitement, de dépasser la classe de plate-forme PF₃.

☛ a. Étude des caractéristiques mécaniques

L'évolution des performances mécaniques étant trop lente pour pouvoir fixer des valeurs de R_t ou de R_{tb} représentatives du long terme, il faut se référer :

☐ Pour l'étude du comportement sous trafic

à des valeurs IPI et I_{CBR} après 4 j d'immersion réalisés sur deux échantillons de sol traité compacté à l'énergie Proctor Normal et aux deux valeurs de teneurs en eau délimitant la plage des teneurs en eau autorisant sa mise en œuvre correcte (cf. § C1-3.4.).

☐ Pour l'étude du comportement au gel, le cas échéant

des essais de résistance à la compression simple (R_c), effectués sur des éprouvettes de hauteur 10 cm et de diamètre 5 cm, compactées statiquement à w_{OPN} et à 98,5 % de la pd_{OPN} du mélange (cf. tableaux C1-VI et C1-VII) et conservées pendant une durée représentative de celle séparant la fin des travaux de la date probable d'apparition du gel sur le chantier considéré ②.

Les valeurs servant à l'interprétation sont la moyenne d'au moins trois mesures.

☛ b. Critères de jugement

☐ Premier critère

On doit vérifier, pour les deux teneurs en eau considérées et les dosages en chaux correspondants, le respect simultané des deux conditions suivantes :

$$I_{CBR} \geq 20 \text{ et } \frac{I_{CBR}}{IPI} \geq 1$$

☐ Second critère

S'il y a un risque de pénétration du gel dans la couche de forme, il faut que la résistance en compression du sol traité à l'âge correspondant à la date probable d'apparition du gel sur le chantier considéré respecte la condition :

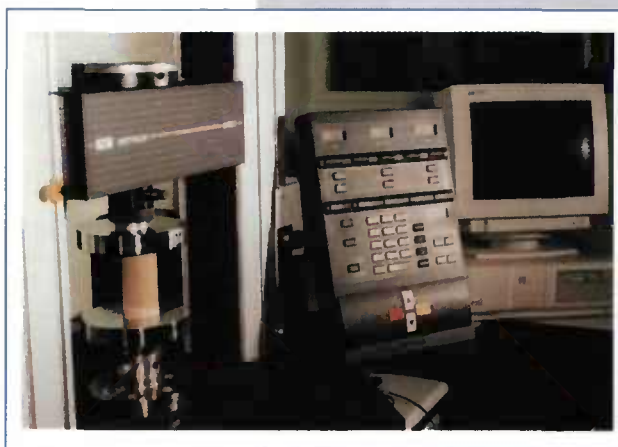
$$R_c \geq 2,5 \text{ MPa}$$

Remarque. Cette valeur est à retenir dans l'état actuel des connaissances. Le traitement à la chaux seule n'est cependant pas à conseiller en général lorsque, à la date d'apparition possible du gel, l'âge du sol traité est inférieur à trois mois (90 j). La raison justifiant qu'une résistance à la compression simple ait été retenue pour les mélanges sols-chaux (de préférence à une résistance en compression diamétrale) s'explique par la rigidité relativement faible à court et moyen terme de ces matériaux, qui ne permet pas une interprétation correcte d'un essai de compression diamétrale. Si l'on dispose toutefois de 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 cryo-succion ne sont véritablement significatifs que lorsque les matériaux ont la possibilité de se trouver dans un état saturé au moment du gel (couche de forme mise en œuvre en déblai avec probabilité de nappe affleurant l'arase notamment).

● 3.6.2. Traitement aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux

Le comportement du sol traité est à évaluer vis-à-vis de :

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



Les deux essais de base pour l'évaluation de la résistance mécanique des sols traités avec des liants hydrauliques

Mesure de la résistance en compression simple (sur éprouvettes d'élançement 2) pour caractériser le comportement à court terme.



Mesure de la résistance en compression diamétrale et du module en traction pour caractériser le comportement à long terme et dimensionner la structure.

L'étude est réalisée sur des éprouvettes dont les dimensions et les modalités de compactage sont données dans les tableaux C1-VI et C1-VII et pour une teneur en eau $w = w_{OPN}$ (du mélange).

a. Caractéristiques mécaniques représentatives et critères de jugement

Ces éléments sont donnés dans le tableau C1-IX.

TABLEAU C1-IX
Exigences requises pour les caractéristiques mécaniques d'un sol traité avec un liant hydraulique dans le cas d'une étude de niveau 1

Aspect du comportement du sol traité considéré	Caractéristiques mécaniques représentatives *	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 ☉ 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 : $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,80$ ☉ (lorsque la VB_s du sol est $\leq 0,5$) ou $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,60$ ☉ (lorsque la VB_s 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 ◊	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 [13] ◆
Performances escomptables à long terme	R_t ou R_{tb} et module élastique 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 ✕

* Toutes les valeurs des caractéristiques énoncées ci-dessus sont la moyenne d'au moins trois mesures

☉ 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

◊ À déterminer à partir des données statistiques des services de la Météorologie Nationale [38] [39] [40]. 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)

◆ 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 cryo-succion 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)

✕ Il s'agit de la classe mécanique considérée dans les tableaux de dimensionnement des couches de forme du GTR

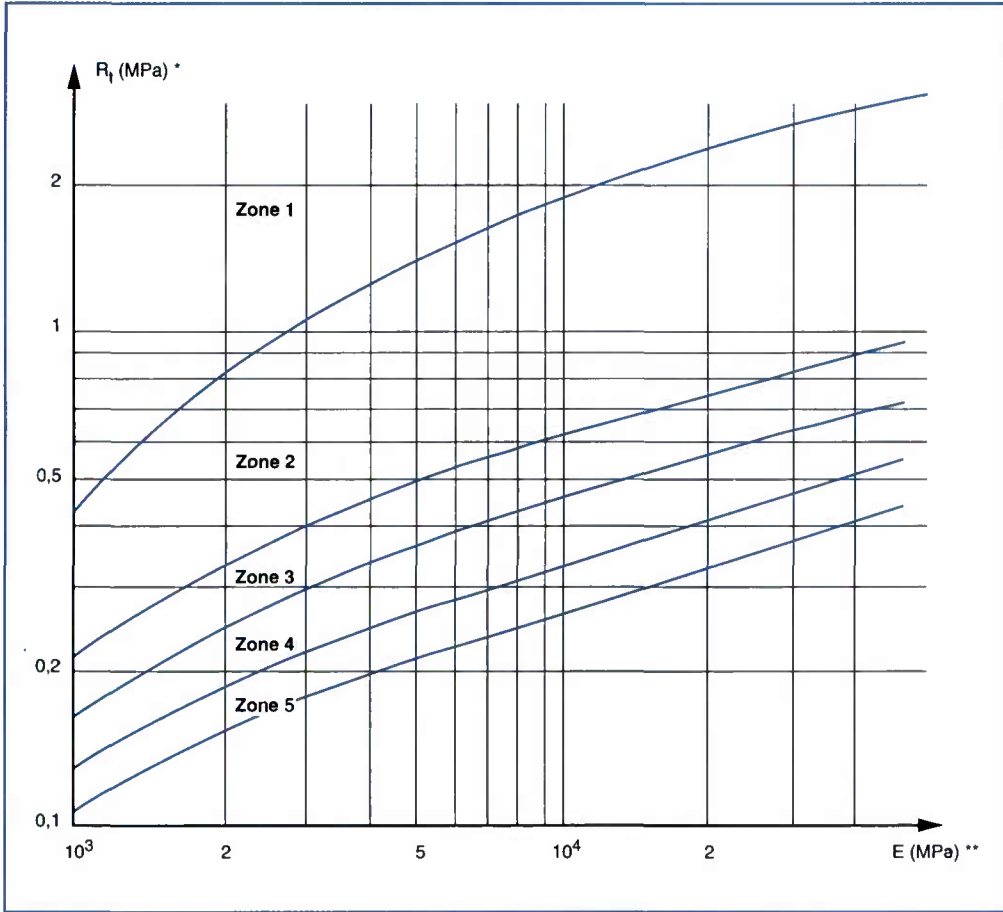


Figure C1-4. Zones de classement du matériau en fonction de sa résistance en traction R_t et de son module élastique E .

(*) Lorsque l'étude a été réalisée à partir d'essais de compression diamétrale, R_t est évalué à partir de la relation : $R_t = 0,8 R_{td}$. (La valeur du coefficient (0,8) a été modifiée par rapport à celle figurant dans le GTR (0,9) pour être en cohérence avec le Guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées, SETRA-LCPC, 1994 »).

(**) Le module E est déterminé soit à partir d'un essai de traction directe (norme NF P 98 232-2), soit à partir d'un essai de compression diamétrale (norme NF P 98 232-3) en utilisant dans toute la mesure du possible le dispositif de mesure de la déformation diamétrale décrit dans l'article référencé [22].

TABLEAU C1-X
Détermination de la classe mécanique d'un matériau traité en fonction de ses caractéristiques et de son mode de fabrication

Traitement en centrale *	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

* 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)

4. Étude de formulation de niveau 2

4.1. Objectif

L'objectif d'une étude de formulation de niveau 2 est :

- de déterminer le dosage en produit de traitement conduisant à un matériau dont les caractéristiques mécaniques permettent, pour la classe d'arase considérée et l'épaisseur de couche de forme envisagée, d'atteindre les classes de plates-formes proposées dans le tableau C1-XI,
- d'appréhender l'incidence des dispersions normales d'exécution sur les caractéristiques mécaniques du matériau traité et de définir les modalités d'ajustement du dosage en liant permettant de les corriger,
- d'optimiser le(ou les) dosage(s) en produit(s) de traitement.

TABLEAU C1-XI

Classe de PF en fonction de la classe d'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	*	30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
Classe 4	30 cm	35 cm	45 cm ☉	30 cm	35 cm
Classe 5	35 cm	50 cm ☉	55 cm ☉	35 cm	45 cm ☉
Classe de plate-forme obtenue	PF ₂	PF ₃	PF ₄	PF ₃	PF ₄

* 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 AR₁, n'est pas autorisée en dessous d'une épaisseur de 30 centimètres

☉ L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement une mise en œuvre en deux couches

4.2. Consistance

L'étude de niveau 2 comporte les cinq volets suivants.

➤ 1. - L'identification des composants du mélange et le choix du produit de traitement

Ces opérations sont conduites comme décrit dans les § C1-3.2. et C1-3.3. pour l'étude de niveau 1. Ne sont toutefois considérés ici que les liants hydrauliques (ciments et LSR) éventuellement associés à la chaux, ceci en raison de l'expérience insuffisante dont on dispose actuellement sur le comportement des sols traités à la chaux seule. Si

un contexte de chantier justifiait plus particulièrement ce type de traitement, on peut considérer que la méthodologie proposée ci-après pourrait être appliquée en première approche.

➤ 2. - L'étude des caractéristiques de mise en œuvre et du délai de maniabilité

Ces opérations sont conduites comme décrit dans les § C1-3.4. et C1-3.5. pour l'étude de niveau 1. Si l'étendue des valeurs de dosages étudiée n'excède pas trois points (cas le plus fréquent et seul décrit ici), on peut n'exécuter qu'une seule étude Proctor-IPI ❶ qui est alors réalisée sur le mélange dosé à la valeur pouvant être considérée comme la plus probable pour le sol, le liant et le niveau de performance considérés.

❶ Si le contexte de l'étude nécessite d'explorer un domaine dépassant cette valeur, il convient d'exécuter autant d'études Proctor-IPI que de tranches de trois points de dosages considérées, ce qui revient à multiplier d'autant le volume des études décrits dans les volets 3, 4 et 5.

➤ 3. - L'étude de l'évolution des performances mécaniques R_t (ou R_{tb}) et E en fonction du dosage

Cette étude est réalisée pour au moins deux valeurs du dosage en liant. Les modalités de moulage des éprouvettes sont les mêmes que dans l'étude de niveau 1.

Les valeurs des dosages choisies doivent encadrer assez largement la valeur supposée atteindre les performances visées (balayage d'au moins la totalité de la zone du diagramme de la figure C1-4 dans laquelle on cherche à se situer). Lorsque l'on dispose d'une bonne connaissance des interactions du sol avec le liant, on peut se limiter à deux valeurs de dosage seulement, mais si ce n'est pas le cas, il y a le plus souvent avantage à considérer trois valeurs de dosage (voire plus) afin de réduire les risques d'un mauvais choix de départ. En effet, la qualité du choix de départ ne pouvant s'évaluer en principe qu'au bout d'un temps relativement long (90 j, voire 180 j pour les liants à prise lente), l'accroissement du volume de l'étude auquel on est ainsi conduit n'est le plus souvent pas en rapport avec les problèmes inhérents aux délais nécessaires à une reprise éventuelle, même partielle, de l'étude.

➤ 4. - L'étude du comportement au jeune âge du matériau traité

Cette étude permet d'évaluer l'aptitude du matériau traité à être remis sous circulation ainsi que sa résistance à l'immersion et au gel. Pour cela, on retient le dosage pris en compte pour l'étude Proctor-IPI indiquée dans le volet 2 ci-dessus (cf. § C1-4.2.2.). Pour la formule correspondant à cette valeur, on mesure les différentes caractéristiques R_c à 7 ou 28 j, R_c , R_{tb} définies au § C1-3.6.2. pour l'étude de niveau 1.

➤ 5. - L'étude de la sensibilité du comportement mécanique du sol traité vis-à-vis des dispersions de dosage, de compacité et d'état hydrique prévisibles dans le contexte du chantier

Cette étude a pour objet de quantifier les effets des dispersions d'exécution sur les performances mécaniques et d'évaluer dans quelle mesure ils peuvent être compensés par un ajustement du dosage en liant.

Elle est menée sur la formule retenue pour l'étude Proctor-IPI (cf. § C1-4.2.2.).

On mesure la R_{tb} (ou la R_t) à 90 j (ou à 180 j dans le cas des liants à prise lente) obtenue sur des éprouvettes de mêmes dimensions que celles utilisées pour l'étude définie au § C1-3.6.2. et confectionnées selon les modalités indiquées dans le tableau C1-XII.

TABLEAU C1-XII
Modalités de confection des éprouvettes pour l'étude de sensibilité aux paramètres d'influence

Paramètres d'influence	Dosage	Masse volumique	Teneur en eau
Dosage et état de compacité	90 % du dosage de la formule de base	94 % $\rho_{d_{OPN}}$	w_{OPN}
Dosage et état hydrique	90 % du dosage de la formule de base	96 % $\rho_{d_{OPN}}$	0,9 w_{OPN} et 1,1 w_{OPN}

Remarques.

- Lorsque les enjeux du traitement sont importants (gros chantier, forte participation de la couche de forme dans la structure de chaussée, etc.), il est recommandé d'effectuer l'étude de la sensibilité du comportement mécanique vis-à-vis des dispersions d'exécution en faisant varier séparément chaque paramètre d'influence, toutes choses égales par ailleurs. L'alourdissement de l'étude résultant de cette procédure est largement compensé, pour ces types de chantiers, par l'accroissement de précision apporté, en particulier pour définir la nature des dispositions à prendre en cas d'anomalies constatées en cours de chantier.
- Les valeurs des dispersions considérées dans le tableau C1-XII sont indicatives et s'appuient sur les constatations réalisées sur des chantiers bien suivis. Si l'on a des raisons de penser qu'elles seront différentes, il conviendra de considérer des valeurs plus représentatives.
- L'examen du tableau C1-XII montre qu'il n'a pas été jugé réaliste de considérer la situation correspondant à la conjonction de toutes les dispersions ayant une incidence défavorable sur le comportement mécanique du sol traité, bien que la probabilité d'apparition d'une telle situation ne soit pas nulle.

■ 4.3. Interprétation

● 4.3.1. Les caractéristiques de mise en œuvre

Les caractéristiques de mise en œuvre mesurées pour le dosage de la formule de base doivent satisfaire les critères indiqués au § C1-3.4.

● 4.3.2. Le dosage de la formule de base

Le dosage de la formule de base retenue doit satisfaire les critères de comportement au jeune âge indiqués dans le § C1-3.6.2. pour l'étude de niveau 1.

● 4.3.3. L'évaluation des effets des dispersions d'exécution

L'évaluation des effets des dispersions d'exécution sur les performances du matériau, ainsi que la manière pour les compenser par l'ajustement du dosage en liant, ou pour optimiser le dosage en liant, sont étudiées à partir du diagramme (E - R_i) de la figure C1-4 et selon une méthode graphique développée dans l'annexe 7.

● 4.3.4. Le dosage à retenir

Le dosage à retenir est celui qui permet de satisfaire le couple classe mécanique-épaisseur cherché dans le cas où l'effet des dispersions d'exécution se révèle être le plus défavorable (cf. annexe 7).

Remarque. Il est souhaitable que le point représentatif du couple $E-R_t$ (ou $E-R_{tb}$), correspondant au dosage choisi a priori pour réaliser l'étude de sensibilité, se trouve dans la zone du diagramme E, R_t correspondant à la classe mécanique visée (ce qui traduit une bonne connaissance a priori du comportement du mélange), mais si cela n'est pas le cas, la méthode graphique proposée en annexe 7 pour ajuster le dosage reste néanmoins applicable.

5. Étude de formulation de niveau 3

■ 5.1. Objectif

Une étude de niveau 3 est à réaliser, comme indiqué sur la figure C1-2, lorsqu'un dimensionnement de l'ensemble « couche de forme-structure de chaussée », utilisant une méthode de calcul (modèle « Alize », par exemple), est envisagé.

L'objectif de l'étude est alors de déterminer, pour différentes formules, les caractéristiques mécaniques E_t et R_t pouvant être introduites dans le modèle de calcul, afin de retenir celles conduisant à une optimisation technique et économique de la chaussée.

L'intérêt d'une telle démarche n'existe véritablement que pour des chantiers importants pour lesquels on peut justifier :

- d'études de reconnaissance géotechnique et de formulation suffisamment fines pour évaluer de manière fiable les valeurs du module du sol support à entrer dans le modèle de calcul et le niveau des performances mécaniques visé pour le matériau de couche de forme,
- d'une vérification de la cohérence des conditions d'exécution avec le niveau des dispersions pris en compte dans l'étude, sur la base d'une épreuve de convenance spécifiquement conçue et rigoureusement exécutée,
- d'une exécution du chantier conforme aux conclusions de l'épreuve de convenance,
- de la mise en place d'un système d'assurance de la qualité prévoyant notamment un contrôle des caractéristiques mécaniques obtenues sur le chantier, réalisées sur carottes et/ou par mesures d'ovalisation et représentant une population statistiquement représentative,
- de la possibilité de corriger par des dispositions constructives *ad hoc* (modification des épaisseurs et/ou des caractéristiques des matériaux des couches sus-jacentes, etc.), les éventuelles anomalies détectées par les contrôles.

■ 5.2. Consistance

Une étude de niveau 3 comprend les quatre volets suivants.

➡ 1. - L'identification des composants du mélange

L'identification des composants du mélange doit être réalisée comme indiqué au § C1-3.2. pour une étude de niveau 1.

➤ 2. - l'étude des caractéristiques de mise en œuvre et du délai de maniabilité

L'étude des caractéristiques de mise en œuvre et du délai de maniabilité doit être effectuée comme pour une étude de niveau 1, mais qui, dans ce cas, risque de nécessiter plusieurs études Proctor-IPI, car il est probable que l'étendue du domaine des dosages à explorer dépasse trois points.

➤ 3. - L'étude du comportement (immersion au jeune âge et résistance au gel)

Une étude du comportement (immersion au jeune âge et résistance au gel) doit être réalisée comme indiqué dans l'étude de niveau 1. Cette étude doit être exécutée pour chacune des valeurs des caractéristiques Proctor déterminées à l'issue du volet 2.

➤ 4. - Détermination des valeurs de E_t et R_t et étude de la sensibilité de ces paramètres aux dispersions d'exécution

Pour les formules jugées *a priori* les plus intéressantes eu égard à l'optimisation recherchée, on détermine les valeurs de E_t et R_t ainsi que la sensibilité de ces paramètres aux dispersions d'exécution. L'étude de sensibilité est conduite comme dans le cas de l'étude de niveau 2 sur des éprouvettes confectionnées selon les modalités proposées dans le tableau C1-X et selon la démarche décrite en annexe 7.

■ 5.3. Interprétation

Pour chacune des formules étudiées dans le volet 4, les valeurs des couples (E_t - R_t) à introduire dans le modèle de calcul sont celles qui se sont révélées les plus défavorables à l'issue de l'étude de sensibilité aux dispersions d'exécution.

Ces valeurs doivent, par ailleurs, être obtenues pour des dosages garantissant un bon comportement à la mise en œuvre, ainsi qu'à l'immersion et au gel tel que défini au § C1-3.6. ou que l'on puisse admettre qu'ils le seront en adoptant au moment du chantier des dispositions particulières éprouvées et validées par l'épreuve de convenance.



Techniques et matériels d'exécution



1. Organisation générale des chantiers 117

2. Exécution des opérations élémentaires 119

- 2.1. Préparation des sols 119
- 2.2. Épandage des produits de traitement 124
- 2.3. Malaxage en place 126
- 2.4. Fabrication en centrale 128
- 2.5. Compactage 129
- 2.6. Ajustement de l'état hydrique 135
- 2.7. Réglage 135
- 2.8. Cloutage 138
- 2.9. Protection superficielle 139

Résumé

La réalisation des couches de forme en sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques requiert l'exécution de différentes opérations élémentaires qui doivent être exécutées selon un ordonnancement précis et, pour certaines d'entre elles, en un temps n'excédant pas le délai de maniabilité du mélange.

Une certaine partie seulement de ces opérations élémentaires est à exécuter dans tous les cas de chantier, ce sont :

- *la fabrication du mélange (en place ou en centrale),*
- *le pré réglage,*
- *le compactage partiel,*
- *le réglage final,*
- *le compactage final,*
- *l'application de la protection superficielle.*

D'autres, en revanche, comme :

- *la préparation initiale du sol,*
- *l'ajustement de l'état hydrique du mélange,*
- *le cloutage, etc.*

ne sont à réaliser que si le contexte du chantier les exige.

Ce chapitre développe les matériels et les techniques d'exécution propres à chacune de ces opérations.

Les opérations élémentaires importantes vis-à-vis de la qualité de l'ouvrage sont les suivantes.

■ **La préparation initiale du sol.** *Elle a pour objet l'homogénéisation des caractéristiques de nature et d'état hydrique du sol pour les mettre en concordance avec les valeurs considérées dans l'étude du matériau traité. Les techniques et le coût de cette opération sont souvent difficiles à définir avec précision au stade de l'étude du projet.*

■ La fabrication du mélange

● *Dans le cas de la fabrication en place, cette opération comprend :*

- *l'épandage du produit de traitement,*
- *le malaxage de ce produit avec le sol,*
- *l'ajustement de l'état hydrique du mélange, le cas échéant.*

➤ *L'épandage doit répartir la masse surfacique du produit de traitement correspondant au dosage recherché. Des progrès dans la précision de cette opération sont encore souhaitables.*

➤ *Le malaxage doit être réalisé avec des gros pulvérisateurs de sol à arbre horizontal. Il permet d'obtenir une qualité satisfaisante sur la quasi-totalité des sols dont la dimension des plus gros éléments n'excède pas 100 millimètres.*

➤ *L'ajustement de l'état hydrique consiste soit à humidifier le mélange par arrosage, soit à l'assécher par aération et/ou traitement à la chaux vive. On constate en pratique que c'est l'arrosage qui est le plus souvent concerné. Il doit être exécuté avant le compactage partiel avec beaucoup de rigueur, car un manque d'eau a des conséquences plus sensibles sur les performances d'une couche de forme en sol traité qu'un excès d'eau de même ampleur.*

● *Lorsque le mélange est fabriqué dans une centrale, sa qualité est en principe mieux maîtrisée que celle obtenue par traitement en place, à condition que l'écoulement du sol dans les organes de dosage se fasse correctement, ceci n'est possible qu'avec des sols non argileux ou des sols moyennement argileux prétraités à la chaux.*

■ **Le réglage.** *Dans le cas des couches de forme en sols traités, il n'est pas acceptable de réaliser le réglage final de manière traditionnelle par comblement des sous-profils par les sur-profils, du fait de la destruction de la prise qui en résulterait. Pour garantir la conformité de l'épaisseur de la couche traitée à la valeur prise en compte dans le dimensionnement de la structure, il est impératif que le réglage soit obtenu par rabotage, sur toute la surface de la couche, d'une certaine épaisseur de sol traité. Ceci nécessite d'exécuter le réglage en deux séquences : pré réglage à une cote sauvegardant, après compactage, une certaine surepaisseur qui est éliminée lors du réglage final.*

■ **Le compactage.** *Il a pour objet l'obtention de valeurs de compacité, notamment en fond de couche, conformes à celles prises en compte dans l'étude du dimensionnement de la structure. Il doit se faire également en deux séquences (compactage partiel et compactage final) séparées par l'opération de réglage final. En outre, des moyens complémentaires de compactage sont souvent nécessaires pour résoudre des problèmes spécifiques tels que le feuilletage, le pré réglage, la fermeture de surface, etc.*

■ **La protection superficielle.** *Elle a pour objet de maîtriser l'évaporation du sol traité et/ou de le protéger de l'imbibition durant la prise hydraulique. Elle a également souvent un rôle de protection vis-à-vis des émissions de poussières et des agressions du trafic de chantier. Pour remplir les rôles pouvant lui être dévolus, elle fait appel à différentes techniques : pulvérisation d'eau, enduit de cure, enduit gravillonné mono ou bicouche, etc. qu'il convient de choisir en fonction du contexte du chantier.*

La réalisation des couches de forme en sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques fait appel, suivant les cas de chantier, à un plus ou moins grand nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis, un savoir-faire particulier et des matériels spécifiques variés.

- Il convient donc de redéfinir, à l'occasion de tout nouveau chantier, les opérations élémentaires nécessaires et de les engager dans un ordre déterminé.
- Il faut ensuite choisir, pour chacune d'elles, les matériels adaptés et les utiliser selon des modalités permettant de satisfaire les exigences de qualité recherchées [2].

Ces deux aspects sont développés ci-après.

1. Organisation générale des chantiers

La figure C2-1a recense les différentes opérations élémentaires pouvant intervenir dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité et la figure C2-1b présente leur ordonnancement pour les quatre cas types de chantier courants.

Toutefois, comme indiqué sur la figure C2-1b, l'exécution de la totalité de ces opérations élémentaires n'est pas impérative.

C'est, en particulier, le cas pour :

- la préparation des sols préalablement à leur traitement,
- la fermeture de surface,
- l'arrosage du mélange,
- le cloutage.

C'est à l'ingénieur d'apprécier, pour chaque chantier, en fonction des éléments développés dans le § C2-2., la nécessité ou non d'exécuter tout ou partie de ces opérations élémentaires.

De manière générale, on retiendra que :

□ Une préparation des matériaux

(élimination des éléments blocailloux, homogénéisation, humidification) doit être exécutée dès lors que l'étude de traitement a conclu à sa nécessité au vu des résultats de la reconnaissance géotechnique ou, le cas échéant, de ceux d'un chantier expérimental (cf. § C1-1.4.).

□ La fermeture superficielle

réalisée par un compactage léger a pour objet une réduction sensible des infiltrations d'eaux pluviales et un meilleur préréglage. Elle est toujours nécessaire lorsqu'on approvisionne le sol dans l'état « non traité » à l'emplacement de la couche de forme.

□ L'ajustement de l'état hydrique du mélange par arrosage

est très souvent à envisager, même lorsque les sols paraissent assez humides avant le traitement, étant donné les valeurs élevées des dosages en liant appliquées et l'évaporation importante pouvant se produire durant le malaxage.

Figure C2-1a

Opérations élémentaires intervenant dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité

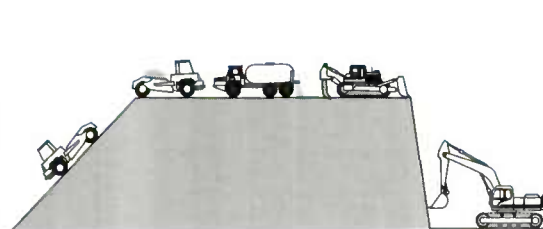
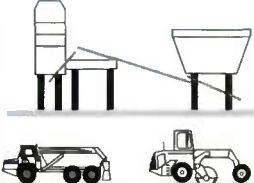

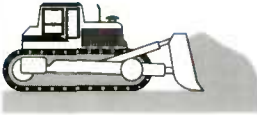

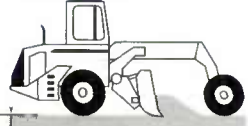
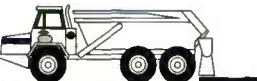
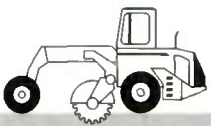


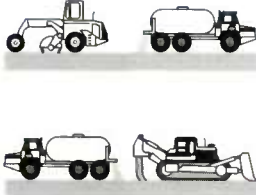
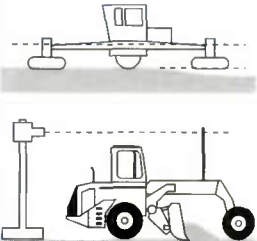


 <p>PRÉPARATION Tri + homogénéisation + humidification (éventuels)</p>	 <p>FABRICATION du mélange en centrale ou en place hors du lieu de mise en œuvre de la couche de forme</p>	 <p>APPROVISIONNEMENT du matériau sur le lieu de mise en œuvre de la couche de forme</p>	 <p>RÉGALAGE du matériau approvisionné</p>	
 <p>FERMETURE de surface par compactage léger</p>	 <p>$e_{\text{prérég}} = 1,1 \text{ à } 1,25e_{\text{couche de forme}}$ $h_{\text{prérég}} = h_{\text{projet}} + 0,1 \text{ à } 0,25e_{\text{couche de forme}}$ PRÉRÉGLAGE de la plateforme</p>	 <p>ÉPANDAGE du produit de traitement</p>	 <p>MALAXAGE du sol avec le produit de traitement</p>	 <p>COMPACTAGE partiel (environ 80% de l'énergie nécessaire) ou COMPACTAGE final</p>
 <p>SCARIFICATION</p>	 <p>ARROSAGE du mélange</p>	 <p>RÉGALAGE FINAL</p>	 <p>CLOUTAGE</p>	 <p>PROTECTION SUPERFICIELLE</p>

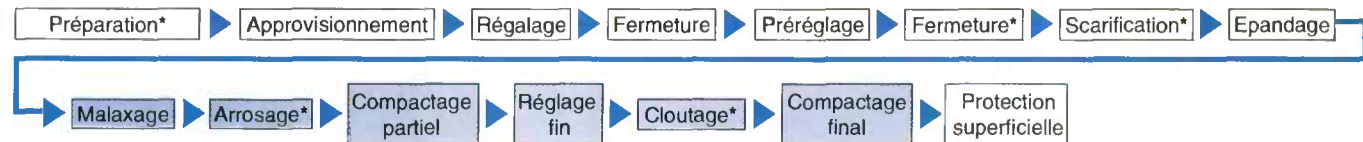
Figure C2-1b

Ordonnancement des opérations élémentaires pour quatre cas de chantier types

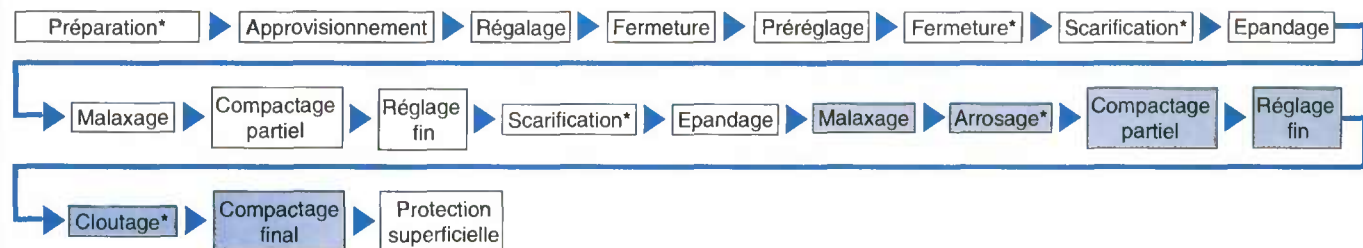
1er cas : approvisionnement à l'emplacement de la couche de forme d'un sol préalablement traité en centrale ou en place



2e cas : approvisionnement d'un sol non traité à l'emplacement de la couche de forme et traitement en place avec un liant hydraulique ou à la chaux seule



3e cas : idem 2e cas mais le sol est soumis à un traitement mixte chaux + liant hydraulique



4e cas : Traitement d'un fond de déblai (ne nécessitant pas de mouvements de terre)

On se reporte au cas 2 ou 3 suivant qu'il s'agit d'un traitement avec un seul produit de traitement ou d'un traitement mixte en excluant toutefois les 4 premières opérations



* L'exécution de cette opération ne doit pas être systématique. Elle dépend des conditions de chantier

 Opérations devant être exécutées pendant le délai de maniabilité du mélange

❑ Le cloutage

par enchâssement de gravillons de fort calibre dans la plate-forme est nécessaire lorsque le matériau traité est un sol fin (classes A principalement) et que la couche de forme doit supporter un trafic de chantier important (*cf.* § C2-2.8.).

Un autre point important à prendre en compte dans l'organisation du chantier est, comme indiqué sur la figure C2-1b, l'obligation d'exécuter certaines de ces opérations élémentaires dans le délai de maniabilité du mélange lorsque le produit de traitement utilisé est un liant hydraulique (*cf.* § A-2.2.2. et § C1-3.5.). Cette sujétion implique de connaître ce délai et d'organiser le chantier (dimensionnement des ateliers, articulation et programmation des séquences, etc.) afin de le respecter.

2. Exécution des opérations élémentaires

■ 2.1. Préparation des sols

Cette opération comporte tout ou partie des actions suivantes :

- la décohesion du matériau en place par scarification,
- l'élimination de la fraction grossière empêchant le malaxage,
- l'homogénéisation de la fraction malaxable,
- l'humidification ou l'aération pour changer l'état hydrique de cette même fraction.

● 2.1.1. La décohesion du matériau en place

Elle peut s'imposer comme déjà évoqué au § A-4.3.1. pour :

- augmenter la productivité des malaxeurs,
- foisonner le matériau avant humidification pour permettre une meilleure pénétration de l'eau, ou, avant épandage, pour réduire les émissions de poussières,
- faire remonter les éléments blocailleux en surface.

Son exécution ne présente pas de difficultés particulières et se fait principalement à l'aide de défonceuses multidentés (trois au minimum espacées de 40 à 60 cm) montées sur des boteurs ou des niveleuses de forte puissance.

Toutefois, dans le cas des craies et de la plupart des matériaux rocheux tendres qui exigent un traitement avec des liants hydrauliques pour être utilisés en couche de forme, la scarification peut ne pas être avantageuse du point de vue de la qualité du mélange réalisé, car elle réduit la quantité d'éléments fins produits lors du malaxage. C'est en effet sur la fraction fine que se fixe le produit de traitement pour constituer le mortier agrégateur des éléments grossiers. Pour produire la proportion optimale de fraction fine, il peut même, à l'inverse, s'avérer bénéfique de procéder à un recompactage entre deux passes de malaxage (*cf.* § C2-2.5.3.).

● 2.1.2. L'élimination de la fraction grossière

Des indications sur les méthodes et les matériels permettant de réaliser cette opération sont données dans le § A-4.3.2.

On rappelle qu'elle doit être envisagée dès que le matériau comporte une proportion significative d'éléments qui ne peuvent plus être absorbés par les malaxeurs à arbre horizontal sans risque important de ruptures mécaniques ($D_{\max} < 100$, voire 150 mm suivant la nature pétrographique des blocs et la puissance du pulvérisateur). Dans le cas de la fabrication du mélange en centrale, cette valeur est ramenée à 50 millimètres.

L'élimination peut se faire :

- manuellement, après remontée des blocs en surface par scarification (méthode limitée aux petits chantiers),
- par regroupement et ramassage à l'aide d'engins spécifiques, essentiellement agricoles, après remontée des blocs en surface par scarification,
- par criblage.

Élimination de la fraction grossière

La présence dans le sol de blocs voire d'objets encore plus indésirables ! constitue certainement le principal handicap à la généralisation du traitement des sols



La présence de quelques blocs de 300 mm dans une moraine glaciaire rend inopérante une charrue à disques.

⇒
Quant à ces ogives d'obus de 75 mm découvertes dans les déblais d'un tracé traversant les champs de bataille de la première guerre mondiale, leur nocivité se passe de commentaires !



Des éléments de 50 à 100 mm ont rapidement endommagé et supprimé toute efficacité à ce pulvérisateur de sol de première génération.



Cette opération est d'autant plus difficile à réaliser que le matériau comporte une matrice argileuse importante et humide. Le prétraitement à la chaux selon une technique « remblai » peut, dans certains cas (sols des classes CiB_{jh} notamment), faciliter considérablement la séparation par criblage des éléments blocailloux, mais il faut reconnaître que, pour certains sols (classes CiA_{jh} en particulier), il n'existe pas actuellement de solution totalement satisfaisante à ce problème.



Le ramassage manuel des blocs une fois remontés en surface par scarification peut être une solution acceptable sur de petits chantiers (plate-forme industrielle, par exemple).

Le chargement des matériaux dans les engins de transport au travers d'une grille fixée sur la benne est une bonne solution technique mais plus discutable au plan économique



La grille fixée sur la benne.



Le chargement au travers de la grille.

L'élimination des éléments blocailloux d'une moraine glacière (classe C₁B_{5m}) à l'aide d'un crible mobile actionné par l'engin de chargement s'est révélée une solution intéressante pour un chantier important



L'ensemble du crible avec les éléments refusés éjectés sur le côté.



La séquence de chargement dans le tombereau.

Quelques techniques d'élimination des éléments blocailloux

● 2.1.3. L'homogénéisation des matériaux

La réussite de cette opération requiert une bonne reconnaissance du gisement afin de pouvoir définir au départ, et ajuster en cours de travaux, la méthode d'exploitation qui produira la correction de l'hétérogénéité recherchée. Les techniques d'homogénéisation utilisées sont principalement les suivantes.

☛ a. L'homogénéisation au cours de l'extraction et du chargement

C'est la méthode la plus couramment pratiquée. Sa fiabilité exige que les matériaux à trier se distinguent de visu aisément et que l'atelier d'extraction et de chargement soit adapté à leur disposition dans le gisement (couches, poches, lentilles, etc.). La séparation s'effectue soit avec des décapeuses, soit plus rigoureusement en réalisant un gerbage des matériaux (en tas ou en cordons), puis leur reprise par des pelles ou chargeurs. Les matériaux séparés font alors l'objet de mouvements de terres distincts.

☛ b. L'homogénéisation au cours de l'extraction et du chargement suivi d'une mise en dépôt provisoire et d'une reprise

Cette méthode est la plus fiable. Elle a évidemment un coût non négligeable, mais celui-ci doit être évalué par rapport au niveau de qualité apporté. Ce niveau est notamment à rechercher dans le cas de la prise en compte de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée. L'intérêt d'un dépôt-reprise peut, par ailleurs, être imposé par le mouvement des terres (par exemple, lorsqu'il est prévu de réserver les sols fins de surface pour réaliser la couche de forme) ou par le mode de fabrication (le traitement en centrale nécessite en effet d'approvisionner des stocks importants pour alimenter la centrale).

L'opération de dépôt-reprise peut également être mise à profit pour procéder soit à l'humidification du matériau comme décrit plus loin, soit à son prétraitement à la chaux, le cas échéant ; dans ce dernier cas, il faut évaluer l'incidence du délai de stockage sur le comportement du sol prétraité à la chaux lors de sa reprise ①.

Les modalités d'exécution du dépôt-reprise doivent être choisies en fonction des sols (nature et répartition des hétérogénéités dans le gisement, etc.) et des contraintes d'organisation du chantier (ateliers disponibles ou devant être exigés, etc.). La méthode consistant à

① D'après l'expérience actuelle, on peut considérer qu'un stockage de plusieurs semaines, voire plusieurs mois, d'un sol prétraité à la chaux améliore globalement le comportement du matériau lors de sa reprise (meilleure aptitude à sa pulvérisation, en particulier). Il est possible, toutefois, que dans certaines conditions de chantier (sols très argileux prétraités avec des dosages en chaux vive excédant 2 %, température ambiante durant la durée du stockage supérieure à 20 °C, etc.), une prise pouzzolanique importante ait pu se développer et nécessiter des dispositions particulières pour la reprise (utilisation d'un pulvérisateur de sol avant reprise, par exemple).

L'homogénéisation
par constitution
de dépôts
provisoires



Exemple de dépôt provisoire de moraine glaciaire (classe C_1B_5m) aménagé en divers points du tracé pré-criblée en vue de sa reprise pour traitement en place avec un liant hydraulique.



Même exemple dans le cas d'un limon prétraité à la chaux vive.

réaliser le dépôt par couches à l'aide de décapeuses et la reprise en butte, sur une hauteur de plusieurs mètres au chargeur ou à la pelle, est une méthode donnant en général de bons résultats. Lorsque les pentes de talus adoptées le nécessitent, il convient de compacter chaque couche élémentaire du dépôt de manière à garantir sa stabilité vis-à-vis de glissements éventuels et de terminer par un profilage soigné des talus, suivi d'une fermeture de la surface par deux à trois passes de compacteurs (de préférence avec des compacteurs à pneus) pour limiter les entrées d'eau pluviales (cf. § B-1.5.2.).

● 2.1.4. L'humidification

Cette opération a pour but d'obtenir, si nécessaire, un changement d'état hydrique du matériau à traiter. Elle doit être distinguée de l'opération d'arrosage telle que définie dans le GTR et reprise dans le § C2-2.6. qui ne vise qu'un ajustement final de l'état hydrique du mélange au stade ultime de sa mise en œuvre.

En général, il convient de viser, en fin d'humidification, une valeur de teneur en eau se situant au voisinage du milieu de la plage définissant l'état « h » du sol naturel, en raison des actions immédiates des produits de traitement (assèchement + élévation de la résistance au cisaillement) et de l'évaporation produite durant la fabrication et la mise en œuvre (cf. § A-2.). Compte tenu des quantités d'eau nécessaires et des difficultés à réaliser son incorporation de manière homogène, cette opération n'est plus réaliste en pratique dès que le besoin en eau dépasse 5 à 7 %.

Pour assurer une répartition homogène de l'eau dans le sol, l'humidification doit se faire sur le matériau scarifié sur environ les deux tiers de l'épaisseur de la couche prise en compte dans le calcul des quantités d'eau à épandre. Ces quantités ne doivent pas excéder des valeurs correspondant à une élévation de teneur en eau de 2 à 3 % par séquence. Si la modification d'état hydrique recherchée dépasse ces valeurs, il faut procéder en plusieurs séquences espacées d'un délai tel qu'indiqué dans le tableau C2-1 et scarifier entre deux séquences.

Dans le cas de l'humidification des sols A₂, B₆, et surtout A₃, il convient, dans toute la mesure du possible, de procéder à cette opération en fin de journée (mise à profit de la période où l'évaporation est minimale).

Dans tous les cas, l'humidification doit être conduite en cohérence avec les prévisions météorologiques locales.

TABLEAU C2-1
Modalités d'humidification à respecter en fonction des sols

Classes de sols	Délai à observer entre deux séquences d'humidification
D ₁ - D ₂ - B ₁ - B ₃	Aucun
B ₄ - B ₂	10 à 15 min
A ₁ - B ₅	1 à 2 h
A ₂ - B ₆	2 à 4 h
A ₃	8 h

L'humidification des sols.
Lorsque cette opération est nécessaire, elle nécessite presque toujours de grandes quantités d'eau



Arroseuse de grande capacité (supérieure à 80 m³) adaptée à la nécessité d'élever de plusieurs points la teneur en eau d'un limon de classe A₂5 destiné à la réalisation d'une couche de forme traitée avec un liant hydraulique.



La nécessité de disposer de quantités d'eau importantes peut souvent justifier l'aménagement, le long du tracé, de bassins provisoires alimentés autant que possible par la collecte des précipitations locales.

❶ En effet, le répandage en plusieurs passes est à éviter en raison des risques d'erreurs et de variabilité du dosage (oubli ou ajout de passes, recouvrements entre bandes, etc.) et des émissions de poussières de liant (car l'épandeur est alors obligé de rouler sur une surface recouverte de liant). Il faut signaler, toutefois, qu'une majorité d'épandeurs actuels ne sont pas satisfaisants de ce point de vue, car limités à des débits de l'ordre de 30 kg/m^2 (valeur assez souvent inférieure aux quantités demandées).

L'apport d'eau doit être maîtrisé quantitativement (il est souhaitable, par exemple, d'équiper les arroseuses de pompes à débit asservi à la vitesse d'avancement du véhicule ainsi que de débitmètres pour le contrôle)

Par ailleurs, l'eau répandue ne doit ni se concentrer, ni ruisseler dans les traces du véhicule d'où l'intérêt, par exemple, d'utiliser des rampes d'aspersion déportées (cf. § C2-2.6.).

La qualité de l'eau utilisée doit satisfaire les exigences de la norme NF P 98-100.

■ 2.2. Épandage des produits de traitement

Les éléments relatifs aux épandeurs, au calcul des quantités de produit à épandre et à la technique d'épandage ont été, pour l'essentiel, développés dans le § A-4.2.

Vis-à-vis de la réalisation des couches de forme en sols traités, il convient de retenir que :

- la technique de l'épandage « au sac » sur des plates-formes préalablement quadrillées pour délimiter la surface correspondant à la masse d'un sac est techniquement acceptable, mais quasiment inappliquée pour des raisons opérationnelles et économiques évidentes. Elle peut néanmoins être envisagée pour des chantiers exigus ou de géométrie complexe ne permettant pas une évolution correcte des épandeurs ;
- lorsqu'il est prévu un traitement mixte, l'épandage de la chaux peut être réalisé selon les modalités admises pour le traitement en vue du réemploi en remblai de sols trop humides (cf. § B-1.4.2.) ;
- dans les autres cas, les épandeurs autorisés sont, au minimum, des épandeurs à doseur volumétrique dont le débit est asservi à la vitesse de déplacement du porteur. Leur plage de débit doit, autant que possible, être suffisante pour épandre la masse totale recherchée en une seule passe ❶ ;
- l'épandage doit se faire, sur toute la surface à traiter, par bandes parallèles adjacentes bord à bord ou mieux avec un recouvrement de quelques centimètres pour compenser la largeur du talus de chaque bande (fig. C2-2). Une telle exigence est justifiée par l'impuissance des pulvérisateurs à arbre horizontal à répartir les irrégularités d'épandage, non seulement longitudinales mais également transversales. Cette opération nécessite donc une bonne dextérité du conducteur et de bonnes conditions de visibilité (en particulier, l'épandage de nuit avec les phares comme seul éclairage est inacceptable) ;

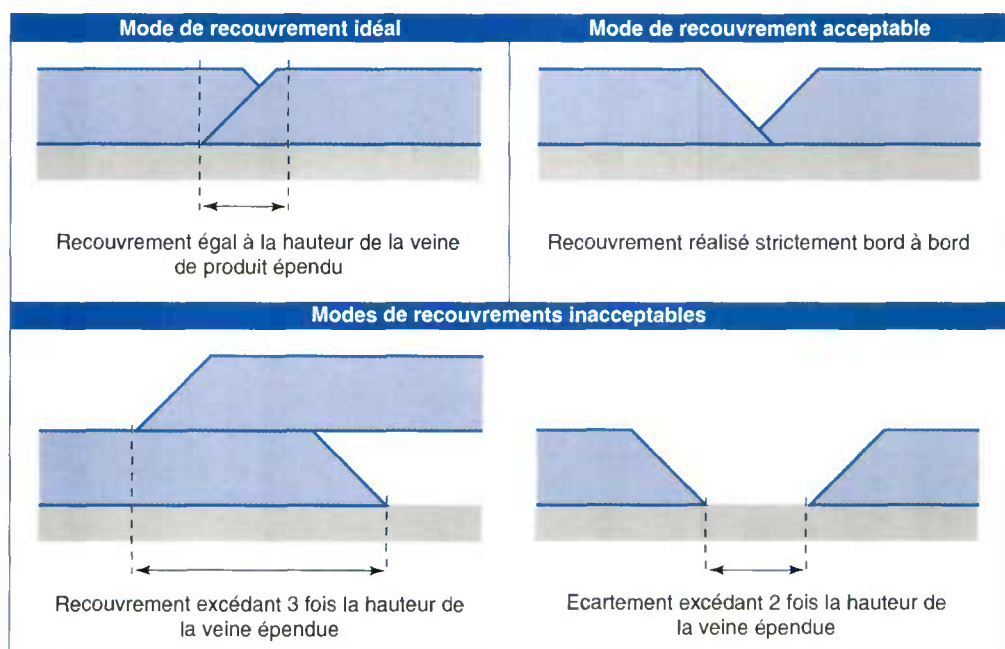


Figure C2-2.
Modalités
d'épandage
des bandes
de produit
de traitement.

L'épandage des produits de traitement.
La réalisation de couches de forme traitées en place exige impérativement des épandeurs précis et en excellent état de fonctionnement



Épandeur moderne (troisième génération) équipé notamment d'un dispositif de variation de la largeur d'épandage et d'un système pondéral de contrôle des masses surfaciques de produit épandu.

Détail d'un dispositif de renvoi en cabine des informations du système de pesée embarqué sur un modèle d'épandeur particulier.



➤ la précision de l'épandage, définie comme indiqué au § A-4.2.2 et déterminée selon la méthode décrite en annexe 6, doit être telle que la dispersion de l'épandeur exprimée par son coefficient de variation soit inférieure à 10 % ❶ et que l'exactitude (écart entre la valeur moyenne de la masse épandue et la valeur visée) soit inférieure à 5 % (cf. § C3-1.1.).

Le respect de ces conditions devrait être grandement facilité par l'utilisation d'épandeurs modernes ❷ comportant :

- un doseur dont le débit en une passe atteint 50 kilogrammes par mètre carré,
- un dispositif de contrôle et d'enregistrement (éventuellement discontinu) de la masse épandue par unité de surface (cuve montée sur pesons et mesure de la distance parcourue par capteurs spécifiques, par exemple),
- la possibilité de faire varier la largeur d'épandage,
- des dispositifs d'aide à la conduite et, en particulier, une alerte en approche de fin de vidange de la cuve, avec simultanément arrêt automatique de l'épandage, des repères de guidage pour réaliser l'épandage comme décrit sur la figure C2-2,
- différents dispositifs pour limiter les émissions de poussières de produits de traitement tels que : capotage des organes en mouvement, canalisation et évacuation correcte des courants d'air provenant des circuits de ventilation ou d'air comprimé divers, filtration des échappements à la sortie des orifices de purge durant le remplissage, etc. (cf. annexe 5).

❶ Des valeurs de l'ordre de 5 % devraient cependant être progressivement exigées, car possibles avec les épandeurs modernes.

❷ Les épandeurs de construction récente présentent déjà certains de ces aménagements.

■ 2.3. Malaxage en place

À l'exception des cas de chantier décrits au § C2-2.3.6. ci-après, le malaxage en place du sol avec le ou les produit(s) de traitement doit être réalisé avec des pulvérisateurs de sol à arbre horizontal. Ces appareils produisent, en effet, un mélange dont la qualité est comparable à celle obtenue dans une centrale de fabrication, dès lors que l'uniformité de l'épandage à la fois dans le profil en long et en travers est obtenue. Mais, par ailleurs, à l'inverse des centrales, ces matériels sont en mesure de malaxer correctement des sols argileux et humides.

Le malaxage avec ces engins doit être effectué également par bandes parallèles, mais avec un recouvrement d'au moins 5 à 10 centimètres.

Les éléments descriptifs généraux concernant ces matériels ont été présentés dans le § A-4.4.2. Vis-à-vis de leur utilisation pour la réalisation des couches de forme, les points importants à considérer sont les suivants.

● 2.3.1. La valeur et la régularité de l'épaisseur de la couche malaxée

Cet élément est déterminant, notamment lorsque la couche de forme est intégrée dans le calcul de la structure de chaussée. Dans ce cas, l'épaisseur malaxée doit être maîtrisée dans les tolérances prises en compte dans le dimensionnement de la structure. Il faut considérer que les valeurs maximales des épaisseurs de malaxage données dans les notices des constructeurs sont indicatives ; en l'absence d'« avis technique » du CFTR et si l'épaisseur recherchée est voisine des limites données par le constructeur, ou si le matériau possède une cohésion élevée, une vérification de l'épaisseur traitée doit être faite lors de l'épreuve de convenance. En particulier, un recompactage entre deux passes de malaxage peut s'avérer nécessaire pour contrecarrer le foisonnement du sol qui a pour effet de réduire la profondeur d'action du rotor du pulvérisateur (cf. § A-4.4.2.). Enfin, pour ce qui est de la régularité de l'épaisseur, les engins dont la chambre de malaxage est suspendue entre deux essieux offrent une garantie nettement supérieure à ceux dérivés des matériels agricoles où la chambre est portée à l'arrière du tracteur.

● 2.3.2. La finesse de mouture

On entend, par mouture, la répartition dimensionnelle des mottes de mortier du sol (fraction inférieure ou égale à 0,4 mm) mélangé au produit de traitement qui est constatée à la sortie du pulvérisateur. La mouture dépend, toutes choses égales par ailleurs : du sol à traiter, du type de pulvérisateur et de ses modalités d'utilisation comme précisé ci-après.

Les pulvérisateurs dont le rotor tourne dans le sens inverse de celui des roues motrices produisent la mouture la plus fine. Pour un sol et un appareil donnés, la mouture la plus fine est obtenue pour une combinaison, vitesse de rotation du rotor-vitesse d'avancement de l'engin, particulière qu'il convient de rechercher pour chaque nouvelle situation de chantier. Enfin, la mouture peut être affinée en réduisant l'ouverture de la trappe d'éjection du sol, ce qui a pour effet d'augmenter le remplissage de la chambre de malaxage et le temps de confinement du mélange ; c'est le conducteur qui est le mieux à même d'évaluer, dans un cas de chantier donné, le parti qu'il peut tirer de l'action sur les paramètres vitesse d'avancement du pulvérisateur, vitesse de rotation du tambour de malaxage, ouverture de la trappe d'éjection.



Les pulvérisateurs de sol à arbre horizontal modernes sont munis de pioches à extrémités en carbure de tungstène et rapidement interchangeables. Leur utilisation peut être envisagée sans risques de casse excessifs sur des sols comportant des blocs entre 100 et 150 mm (suivant la résistance de la roche dont ils sont issus et la puissance de l'engin).



La finesse de mouture dépend de nombreux paramètres de fonctionnement de l'engin (vitesse et sens de rotation du rotor, vitesse d'avancement, taux de remplissage de la chambre de malaxage, etc.). Sur la photo, il apparaît nettement que deux engins de morphologie similaire produisent sur le même sol des moutures différentes.

Le malaxage.
La réalisation de couches de forme traitées en place exige impérativement des pulvérisateurs de sol à arbre horizontal en excellent état de fonctionnement

Plus les matériaux sont argileux et humides, plus la mouture sera grossière. C'est donc avec les sols des classes A_2h et surtout A_3h que des moutures trop grossières peuvent se produire. Avec ces matériaux, il faut presque toujours réaliser un prétraitement à la chaux vive, en exécutant le malaxage en deux séquences au moins, espacées d'au moins 4 h (à optimiser en fonction de la situation de chantier) avec, si nécessaire, une fermeture de surface par un compactage léger entre les deux.

Remarque. *Le nombre de facteurs dont dépend la mouture à obtenir fait qu'il n'est en général pas souhaitable d'imposer un nombre de passes d'un type particulier de pulvérisateur, mais plutôt d'imposer une valeur de mouture, en général 0/20 mm, puis d'évaluer les propositions faites par les soumissionnaires (dans le SOPAQ) et, enfin, de constater l'obtention du résultat demandé à l'appui d'une épreuve de convenance durant la phase de préparation du chantier (cf. § C3-2.4.).*

● 2.3.3. La dimension maximale des blocs

La quasi-totalité des pulvérisateurs de sol à arbre horizontal actuels sont munis de bêches (ou de pics) avec extrémités en carbure de tungstène qui admettent, sans risques importants pour leur tenue mécanique, des sols comportant des éléments blocailleux de 50 mm. Avec certains engins récents plus puissants, cette dimension peut aller jusqu'à 100 mm, voire 150 mm

(suivant la puissance de l'engin, la résistance de la roche d'où sont issus ces blocs, la proportion et la consistance de la matrice fine du sol, etc.). Si la dimension des éléments blocailleux risque de compromettre la faisabilité de l'opération, il est nécessaire de lever l'incertitude sur un chantier expérimental engagé au stade de l'étude jugé le plus opportun par rapport aux enjeux de la couche de forme traitée dans le projet (cf. § A-3.2.3. et tableau C1-1).

● 2.3.4. La possibilité d'injecter de l'eau directement dans la cuve de malaxage

Cette possibilité s'avère surtout intéressante pour procéder à un ajustement précis de l'état hydrique du mélange, mais n'est en général pas adaptée à une humidification exigeant plus de deux points de teneur en eau (cf. § C2-2.6.).

● 2.3.5. La présence de dispositifs antipoussières

Ces dispositifs peuvent comprendre, notamment, la possibilité d'injecter de l'eau directement dans la cuve de malaxage évoquée plus haut, le capotage des organes en mouvement, la canalisation et l'évacuation correcte des courants d'air provenant des circuits de ventilation ou d'air comprimé divers, etc. (cf. annexe 5). Il faut reconnaître toutefois que, dans l'ensemble des opérations de traitement en place, le malaxage avec les pulvérisateurs de sol modernes ne constitue pas une source majeure d'émission de poussières de produits de traitement, dans la mesure où les conditions d'état hydrique exigées pour la bonne mise en œuvre du mélange sont respectées.

● 2.3.6. Aspects liés à des particularités de chantier

Dans le cas des chantiers ne permettant pas une évolution correcte des gros pulvérisateurs (élargissement de chaussées, petits chantiers de géométrie complexe, etc.), des matériels plus maniables, tels que des rotobèches, peuvent convenir (sous réserve d'une démonstration sur planche d'essai).

Dans le cas du traitement mixte de sols blocailleux, le malaxage du sol lors du prétraitement à la chaux peut être réalisé en utilisant des charrues. Une fois le prétraitement réalisé, il est alors souvent possible d'éliminer par criblage les éléments grossiers, permettant alors d'utiliser un gros pulvérisateur pour malaxer le sol avec le liant hydraulique.

En revanche, dans le cas du traitement mixte de sols fins, il est généralement justifié de réaliser le prétraitement à la chaux par malaxage avec un pulvérisateur de sol à arbre horizontal. L'éventuel surcoût induit par ce matériel par rapport aux charrues est, en effet, largement compensé par l'amélioration de la qualité du malaxage obtenue.

■ 2.4. Fabrication en centrale

L'expérience a montré que la fabrication des sols traités avec de la chaux ou des liants hydrauliques dans des centrales de niveau 2, équipées notamment de module d'acquisition de données pour la fabrication en continu (cf. normes NF P 98-701 et NF 98-730 et NF P 98-772) offrira une meilleure garantie de qualité que la fabrication en place, à condition que les mélanges s'écoulent correctement dans les différents organes (trémies, doseurs, malaxeurs) des centrales (cf. normes NF P 94-744, parties 1 à 5) [25], [26], [29], [31], [34] et [35]. Ceci s'explique par la plus grande maîtrise des dosages, et surtout de l'état hydrique des mélanges et également du fait de la nécessité de constituer des stocks d'alimentation des centrales qui améliorent très sensiblement l'homogénéité des sols à traiter (cf. C2-2.1.3.).

La qualité de l'écoulement dans les centrales peut être considérée comme satisfaisante avec les sols non cohérents (ou légèrement cohérents, mais ayant subi un prétraitement à la chaux suivi d'un stockage de quelques jours au moins).

Les limites généralement admises comme autorisant le passage des sols dans les centrales courantes sont :

$$D_{\max} \leq 50 \text{ mm et } I_p \leq 12 \text{ (ou } VB_s \leq 2,5 \text{ g)}$$

Ces valeurs sont indicatives car des expériences récentes ont montré qu'elles pouvaient être sensiblement dépassées, en procédant à divers aménagements sur les centrales (suppression des étranglements dans les trémies, couverture des parois de trémies avec des éléments en téflon, mise en place de dispositifs anti-voûte type « chapeau chinois », installation de vibreurs aux endroits sensibles au bourrage, etc.) et, surtout, en exécutant un prétraitement à la chaux préalablement au traitement en centrale [26] [34] [35].

Lorsque les sols à traiter comportent plus de 5 % de fines, il faut recommander des centrales à doseurs pondéraux, compte tenu de la grande variabilité des masses volumiques apparentes des matériaux qui traversent les doseurs volumétriques.

Enfin, il faut avoir prévu, aux abords immédiats de la centrale, les surfaces suffisantes pour la constitution et l'exploitation des stocks de matériaux en attente du traitement.

Compte tenu des sujétions induites par ces aspects, on peut considérer que la fabrication en centrale est réservée aux chantiers dont le volume de matériaux à traiter dépasse 50 000 mètres cubes.

2.5. Compactage

La qualité d'une couche de forme traitée est étroitement liée à son compactage. En particulier, sa résistance à la fatigue varie beaucoup avec le niveau de densification obtenu à la partie inférieure de la couche appelée masse volumique sèche « fond de couche » (pd_{fc}) ①.

Le GTR définit les modalités d'utilisation des compacteurs permettant d'atteindre l'objectif de densification de qualité « q3 » requis pour l'ensemble des couches de forme.

Cet objectif s'exprime par :

$$pd_{fc} \text{ (masse volumique apparente sèche « fond de couche »)} \geq 96 \% pd_{OPN}$$

$$pd_m \text{ (masse volumique apparente sèche « moyenne »)} \geq 98,5 \% pd_{OPN}$$

Toutefois, dans le cas des couches de forme en sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, des dispositions spécifiques complémentaires décrites ci-après sont, le cas échéant, à ajouter aux exigences définies dans les tableaux du GTR.

La fabrication des mélanges en centrale



Vue d'ensemble d'une centrale de fabrication d'un limon traité à 1,5 % de chaux vive + 6 % de liant hydraulique. À remarquer, au premier plan, la grosse citerne souple de plus de 200 m³ utilisée pour le stockage de l'eau destinée à l'ajustement de l'état hydrique du mélange.



La fabrication en centrale nécessite d'aménager des stocks à proximité des trémies d'alimentation des doseurs. Sur la photo, le matériau stocké étant constitué par un limon prétraité à 1,5 % de chaux vive, il est nécessaire au moment de la reprise de le refoisonner à l'aide d'un gros pulvérisateur, pour permettre son écoulement correct dans les organes de la centrale.

① Ce paramètre est encore très souvent désigné sous le terme de densité « fond de couche ».

❶ Ainsi, par exemple (cf. GTR, chapitre 4 du fascicule 1 : tableaux de compactage, pp. 99-102), les sols A₁ ou A₂ requièrent des rouleaux V₄ ou V₅. Quant aux sols A₃ traités à la chaux et au ciment, même les engins les plus puissants ne permettent pas de compacter correctement de telles épaisseurs !

❷ L'analyse du phénomène de feuilletage, ses causes et les moyens de le réduire, voir de l'éliminer, font encore l'objet d'études en cours.

● 2.5.1. Dispositions liées au respect de l'objectif de densification « q3 »

☛ a. Nécessité de disposer de compacteurs puissants

L'épaisseur d'une couche de forme traitée étant généralement de 0,35 m (quelques fois 0,40 m), le compactage en une seule couche élémentaire d'une telle épaisseur pour atteindre le niveau « q3 » nécessite des moyens de compactage puissants ❶. Sans ces moyens, la mise en œuvre de la couche de forme doit se faire en au moins deux couches élémentaires. Dans ce cas et sauf exception (compactage final de chaque couche réalisé dans un délai largement inférieur au délai de maniabilité, garantie d'absence de feuilletage aux interfaces des couches, etc.), l'interface devra, vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la structure, être considéré comme du type « glissant ».

☛ b. Nécessité de compacter rapidement mais impérativement en deux phases : compactage partiel et compactage final

☐ Compactage partiel

Le compactage partiel est réalisé, suivant les cas de chantier, soit après le préréglage, dans le cas où le matériau est approvisionné déjà traité, soit après la fin de la fabrication du mélange, dans le cas où le sol est traité en place et non transporté (cf. fig. C2-1a).

Le compactage partiel doit apporter environ 70 à 80 % de l'énergie exigée pour obtenir la qualité « q3 » (le cas échéant, cette proportion peut être ajustée après interprétation des planches expérimentales effectuées avant le démarrage du chantier). Le but du compactage partiel est d'obtenir, immédiatement après réglage, une densité déjà assez élevée (de l'ordre de 95 % de la compacité finale) et homogène sur toute l'épaisseur de la couche. Une fois terminé, le compactage partiel doit être immédiatement suivi par le réglage final.

☐ Compactage final

Le compactage final doit être réalisé immédiatement après le réglage final. Son but est d'apporter le complément de l'énergie de compactage exigée pour obtenir la qualité « q3 » et, éventuellement, de redensifier la partie supérieure de la couche ayant été désorganisée par le rabotage résultant du réglage final.

Dans le cas, très souhaitable, où l'atelier de compactage comprend un compacteur à pneus lourd, il y a lieu de l'utiliser pour cette seconde phase de compactage, en raison de sa meilleure aptitude à éviter le feuilletage décrit ci-après.

Dans tous les cas, le compactage (compactage partiel et compactage final) doit être terminé avant expiration du délai de maniabilité du mélange (et même sensiblement plus tôt si un cloutage de la plate-forme est prévu, cf. C2-2.8.).

● 2.5.2. Dispositions liées au feuilletage de la partie supérieure de la couche de forme

Le compactage génère très fréquemment, à la partie supérieure de la couche (sur 2 à 5 cm de profondeur voire davantage suivant les sols et les ateliers), un réseau de fissures sensiblement horizontales. Ce phénomène appelé « feuilletage » a, dans le cas des sols traités, un effet défavorable souvent important, car les liaisons de cimentation ne sont pas en mesure de recréer, après prise, une continuité mécanique du matériau sur toute l'épaisseur de la couche ❷.

Ceci a pour première conséquence l'impossibilité de considérer que la liaison d'une couche d'assise sur une plate-forme présentant une zone feuilletée est du type « collée ». Par ailleurs, lorsque cette zone est mise en imbibition, ou si le gel y pénètre, elle subit une fragilisation pouvant fausser de manière importante les hypothèses de dimensionnement déduites de l'étude de traitement.

L'expérience a montré que les facteurs favorables au développement du feuilletage par le compactage sont :

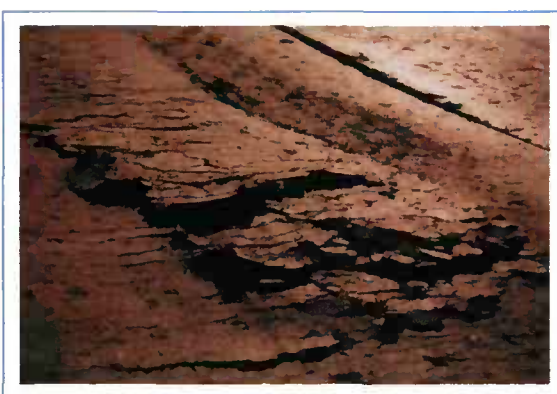
- l'uniformité granulométrique des sols traités, notamment lorsque leur D_{50} se situe dans la plage 50/200 μm et ceci d'autant plus que leur état hydrique se rapproche de l'état « sec » (cela concerne principalement les sables fins du type « sables de dunes », classés B_1 , D_1 , les sablons des classes B_2 et B_5 ainsi que les sols fins peu plastiques A_1),
- l'utilisation de cylindres vibrants lourds à bandage lisses (classes V_4 et V_5).

La méthode actuellement préconisée consiste, lors du réglage fin, à éliminer la majeure partie de la zone feuilletée produite par le compactage partiel, puis à réaliser le compactage final avec des compacteurs à pneus de la classe P_3 .

À la rigueur, si l'on ne dispose pas de tels engins, on peut, immédiatement après le compactage final, ou après le cloutage, lorsque celui-ci est envisagé, exécuter un compactage spécifique à l'aide de compacteurs à pneus de classe P_2 , voire P_1 , lestés au maximum, en effectuant quatre à six passes à 5 km/h, à une pression de gonflage supérieure à 0,7 MPa et après avoir procédé, quelques minutes auparavant, à une pulvérisation d'eau, à raison de 1 à 2 litres par mètre carré.

L'énergie relative à ce compactage spécifique ne doit évidemment pas être prise en compte au titre de l'énergie nécessaire à l'obtention de la qualité « q3 ».

Le compactage



Le compactage de sols traités provoque, notamment, avec des rouleaux vibrants lisses et d'autant plus que les sols sont peu plastiques et homogènes, un feuilletage en partie supérieure de la couche qui est très dommageable vis-à-vis de son comportement mécanique.



L'utilisation de rouleaux vibrants à pieds et l'ajustement de l'état hydrique au voisinage de la valeur « humide » constituent des modalités qui réduisent sensiblement les risques de formation du feuilletage.

❶ En revanche, lorsqu'il s'agit avant tout de réduire l'évaporation, cette fermeture par compactage peut être contre-indiquée et à l'inverse remplacée par une scarification de la surface sur quelques centimètres (suivant l'adage bien connu qu'un binage vaut deux arrosages !).

Une autre voie en cours d'évaluation est d'utiliser des compacteurs vibrants à pieds (classe VP_4 au minimum) pour réaliser le compactage partiel et de raboter, lors du réglage fin, les empreintes laissées à la surface de la couche, et enfin de terminer le compactage final à l'aide de rouleaux à pneus P_3 .

La pertinence de la technique permettant de remédier ou d'éviter le feuilletage est à étudier dans la phase de préparation du chantier et à démontrer lors de l'épreuve de convenance (cf. § C3-2.4.).

Si le dimensionnement de la chaussée résulte d'une optimisation à partir d'un modèle de calcul de l'ensemble couche de forme-chaussée, il convient de prévoir et d'évaluer le coût de la surépaisseur à éliminer lors du réglage final. Celle-ci doit être telle qu'après obtention de la compacité recherchée, il ne subsiste, après rabotage, aucune zone pouvant encore présenter de feuilletage. Elle peut être estimée, au stade de l'étude, à une dizaine de centimètres, mais doit être précisée lors de l'épreuve de convenance.

● 2.5.3. Autres dispositions de compactage pouvant s'appliquer

Suivant les cas de chantiers, il peut être nécessaire de réaliser des compactages intermédiaires pour (cf. fig. C2-1a) :

- assurer la fermeture de la surface, de façon à limiter les entrées d'eau dans une couche en attente de traitement au ciment. Elle est toujours nécessaire lorsqu'on réalise le traitement du sol plus d'une journée après l'avoir approvisionné à l'emplacement de la couche de forme (que ce soit dans son état naturel ou, éventuellement, après l'avoir pré-traité à la chaux) ❶,
- garantir l'épaisseur de la couche malaxée, lorsque sa valeur est voisine des possibilités maximales du pulvérisateur de sol (cf. § A-4.4.2.a. et § C2-2.3.1.),
- améliorer les conditions de réalisation du pré-réglage en homogénéisant la masse volumique du matériau répandu,
- faciliter le compactage partiel, lorsque celui-ci est réalisé après une opération de malaxage, en assurant une traficabilité correcte aux engins lourds utilisés pour le compactage partiel,
- améliorer la finesse de mouture dans le cas de traitement de la craie par exemple ; dans ce cas, un précompactage doit être exécuté entre chaque passe de malaxage.

Les compacteurs affectés à ces actions de précompactage peuvent être des rouleaux vibrant lourds (classes V_3 ou supérieures) fonctionnant sans vibrer, des rouleaux à pneus légers (classes P_1 , voire P_2) ou encore des rouleaux vibrants légers utilisés en vibration (le cas échéant, en utilisant leur plus faible balourd).

Le nombre de passes à appliquer est de l'ordre de deux à trois, ce qui peut représenter jusqu'à 10 % de l'énergie exigée pour l'obtention de la qualité « q3 », mais celle-ci n'entre évidemment pas non plus dans l'énergie exigée pour l'obtention de la qualité « q3 ».

Pour les petits et moyens chantiers, ces dispositions particulières de compactage peuvent être réalisées avec les matériels de l'atelier principal (à condition qu'il soit suffisamment dimensionné), mais l'organisation du chantier sera d'autant plus facilitée que l'on disposera de matériels spécialement affectés à ces tâches.

● 2.5.4. Réalisation de planches expérimentales

La Note d'information SETRA « Compactage des matériaux de remblai et de couches de forme - Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais » peut être utilisée pour décider de l'opportunité de réaliser une ou plusieurs planches d'essais destinées à préciser les conditions de compactage ainsi que pour définir et exécuter le plan d'expérience ①.

Dans ce document, l'attention est attirée, comme d'ailleurs dans le GTR, sur la nécessité, avant de décider l'exécution de telles planches, d'une évaluation du bilan entre, d'une part, le temps, le coût, les moyens à mettre en oeuvre et, d'autre part, le gain pouvant être escompté (en termes de garantie du niveau de densification, d'organisation de chantier, de coût du compactage, etc.) par rapport à la situation qui résulterait de la stricte application du GTR. En particulier, les planches d'essais représentatives de cas de chantier (matériaux et ateliers), pouvant être considérés comme en grande partie décrits dans le GTR, sont inutiles et peuvent conduire à des conclusions erronées si les conditions expérimentales (nature et nombre de mesures) ne sont pas appropriées à l'objectif visé.

Les cas pouvant néanmoins justifier l'intérêt de telles planches sont, par exemple :

➤ la recherche d'un objectif de densification supérieur à celui pris en compte par le GTR comme, par exemple : $pd_{fc} > 98,5 \% pd_{OPN}$ pour 95 % des mesures (alors que le GTR prend en compte seulement 50 % des mesures comme devant être supérieures à 98,5 % pd_{OPN}).

Cet objectif peut présenter un intérêt, en particulier, pour les matériaux tels que les sables propres homométriques, dont la relative facilité d'obtention de la compacité visée est connue (en raison de la faible valeur de la pd_{OPN} caractérisant ces matériaux).

Il est clair qu'un tel objectif implique des essais à la double sonde ou sur carottes pour accéder à la pd_{fc} . La seule prise en compte de la masse volumique apparente sèche moyenne sur l'épaisseur compactée serait tout à fait insuffisante ② ;

➤ la mise en évidence de l'influence de la teneur en eau (à l'intérieur de la fourchette donnée par l'étude de formulation), de façon à fixer la valeur moyenne à rechercher et les conditions pratiques d'humidification. Dans ce cas également, la mesure de la pd_{fc} est nécessaire. Deux ou trois planches d'essais strictement identiques, aux conditions de teneur en eau près, doivent être réalisées ;

➤ l'évaluation de l'influence du malaxage (finesse de mouture, paramètre de fonctionnement, type de malaxeur, etc.) sur la facilité de compactage du sol traité. Dans ce cas également, on pratique par comparaison des valeurs de pd_{fc} obtenues sur des planches se différenciant uniquement par le malaxage effectué ;

➤ l'influence sur les conditions de compactage de l'introduction d'un retardateur de prise ou d'un correcteur granulométrique ;

➤ l'action de compacteurs particuliers (rouleaux vibrants à pieds, par exemple) sur le feuilleteage ;

➤ etc.

Les conclusions tirées de ces planches expérimentales pouvant avoir des conséquences importantes sur l'organisation, les méthodes et les moyens de chantier, voire sur la structure de la chaussée, elles doivent être conçues et engagées le plus en amont possible de la mise en production du chantier (cf. tableau C1-l).

① À paraître.

② Cf. GTR, § 3.4.2.2. et § 3.4.2.3.

L'ajustement de l'état hydrique

Une opération quasiment aussi exigeante en qualité que l'épandage des produits de traitement et pourtant souvent négligée !

L'ajustement de l'état hydrique doit être pratiqué sur un sol préalablement foisonné avec un matériel maîtrisant la quantité et la répartition de l'eau répandue. Sur l'exemple de la photo, la scarification du sol a été correctement réalisée, mais la rusticité de l'arroseuse ne permet ni la maîtrise de la quantité (aucun asservissement du débit à la vitesse d'avancement), ni la régularité de la répartition (ruissellement dans les ornières du tracteur et de la citerne).



Sur le même exemple, vue de la concentration dans les points bas du profil en long de l'eau ayant ruisselé dans les ornières laissées par l'arroseuse.



Quelques propositions de solutions

L'aspersion à l'aide de rampes d'arrosage déportées, alimentées par une pompe à débit variable asservi à la vitesse d'avancement du tracteur, réalisée entre l'avant-dernière passe du pulvérisateur, constitue déjà une sensible amélioration de la précision de l'ajustement de l'état hydrique (même si un ruissellement partiel peut encore se produire dans les traces de la citerne et de son tracteur).



Lorsque l'ajustement de l'état hydrique n'exige pas l'ajout de plus de un à deux pour-cent d'eau, une bonne solution consiste à introduire l'eau directement dans la chambre de malaxage du pulvérisateur, si celui-ci est équipé en conséquence (pompe à débit variable asservi à la vitesse d'avancement alimentée en eau par une citerne, non représentée sur la photo, progressant en parallèle).



■ 2.6. Ajustement de l'état hydrique

Cette opération a pour objet d'ajuster l'état hydrique du mélange de telle manière qu'il se situe, au stade final des opérations de traitement, dans les tolérances envisagées dans l'étude.

L'expérience a montré que les chantiers où le sol se présente dans un état trop humide avant traitement sont relativement rares et les solutions permettant de corriger cette situation sont résolues assez simplement, soit par aération (à l'aide des pulvérisateurs), soit par un traitement à la chaux vive (ou par élévation du dosage en chaux vive dans le cas d'un traitement mixte).

En revanche, la probabilité d'aboutir à la fin du malaxage à un matériau trop sec est beaucoup plus grande et l'incidence de cet état sur la difficulté de satisfaire les exigences de compacité est capitale. Il faut rappeler en effet (cf. § A-1.1.2.) que, dans le traitement en couche de forme, l'apport de matières sèches est important du fait des dosages élevés concernés et que des pertes d'eau de plusieurs points peuvent se produire lors du malaxage par conditions météorologiques évaporantes. Ces conditions font qu'un arrosage est presque toujours nécessaire, même lorsque le sol se trouvait avant traitement dans un état hydrique humide. L'augmentation de teneur en eau visée dans cette opération doit cependant restée limitée, en général à 1 à 2 % (si un besoin supérieur s'impose, c'est au niveau de la préparation du sol qu'il doit être résolu, cf. C2-2.1.4.).

L'arrosage doit être engagé après l'avant-dernière passe du malaxeur à l'aide des matériels déjà décrits pour l'humidification. Les souhaits concernant l'amélioration des matériels d'arrosage exprimés pour l'humidification sont évidemment encore plus justifiés pour l'arrosage.

Un dispositif intéressant, disponible sur certains malaxeurs, permet d'introduire, directement dans la cloche du pulvérisateur, des quantités d'eau, maîtrisées par des pompes à débit asservi à la vitesse de déplacement et contrôlées par débitmètres.

■ 2.7. Réglage

● 2.7.1. Objet et spécificité de cette opération

L'objet de cette opération est de réaliser une couche de matériau traité dont l'épaisseur finale est conforme à la valeur considérée dans la conception de la structure de chaussée, compte tenu des tolérances de nivellement admises.

Pour les couches de forme en sols traités, il n'est pas admissible, contrairement aux matériaux non liés, de réaliser le réglage final par écrêtage des « sur-profils », et transfert du matériau écrêté dans les « sous-profils », puis recompactage. Une première raison en est que l'écrêtage, en déstructurant le matériau traité, détruit les liaisons déjà formées par la prise hydraulique, lesquelles ne se rétabliront plus et conduiront à un matériau dont les performances seront d'autant plus faibles que l'écrêtage aura été réalisé à la limite du délai de maniabilité. Si, comme cela est probable, ce matériau est recompacté dans les sous-profils, dont la surface a déjà été lissée par le compactage, les conditions de continuité mécanique du milieu ne sont plus conservées. Enfin, et surtout, il est très rare que le compactage partiel n'ait pas provoqué un feuillage des quelques centimètres supérieurs de la couche qui sont alors à éliminer (cf. § C2-2.5.2.). Pour ces raisons, il est donc impératif de réaliser le réglage final en éliminant par rabotage une certaine surépaisseur sur toute la surface de la couche de forme. Cette surépaisseur doit, par ailleurs, être la plus faible possible, compte tenu de la plus-value apportée au matériau par le traitement et du fait, déjà mentionné, qu'il n'est plus possible de le réutiliser dans la même nature d'ouvrage ①.

① Il peut, toutefois, être réutilisé avantageusement dans d'autres parties d'ouvrages telles que les parties supérieures de terrassement (PST), les accotements, chemins de désenclavement, voiries secondaires, etc.

● 2.7.2. Organisation de chantier induite par les impératifs du réglage

Pour réaliser correctement le réglage final, il faut enchaîner les opérations élémentaires suivantes : régalage, préréglage, compactage partiel, réglage final comme indiqué sur la figure C2-1b. Celles-ci doivent être exécutées le plus rapidement possible et terminées au plus tard aux trois quarts du délai de maniabilité du mélange, de manière à ménager encore un temps suffisant pour exécuter le compactage final et, dans le cas des sols fins, le cloutage.

☛ a. Le régalage

Cette opération est à considérer principalement dans le cas de chantier 1 de la figure C2-1b (approvisionnement d'un matériau préalablement traité). Elle doit être suivie le plus rapidement possible par le préréglage pour « consommer » le minimum du délai de maniabilité. Dans le cas des gros chantiers ayant prévu la fabrication du mélange en centrale, il est avantageux de réaliser régalage et préréglage simultanément (par utilisation d'un engin du type autograde, par exemple).

☛ b. Le préréglage

Cette opération est à exécuter quel que soit le cas de chantier. Elle a pour objet de réaliser une plate-forme à une cote telle, qu'après approvisionnement, régalage éventuel, épannage, malaxage, arrosage éventuel, compactage partiel, il reste, en tout point de la surface de la couche de forme, une surépaisseur qui sera enlevée lors de l'opération de réglage final. La bonne exécution de cette opération est toujours délicate, car il s'agit à la fois de minimiser cette surépaisseur tout en garantissant l'absence de « sous-profil » et l'élimination de matériau présentant du feuilleteage.

À défaut d'expérience particulière sur le comportement du mélange, il convient, pour définir la cote à laquelle il faut réaliser le préréglage, de prévoir une surépaisseur de la couche de forme de 10 à 25 %. La plage de 10 à 25 % s'explique par les grandes différences de comportement vis-à-vis du compactage (contrefoisonnement, feuilleteage), observées entre les différents mélanges. Dans la pratique, il est souvent avantageux de chercher, durant la phase de préparation de chantier, à optimiser cette surépaisseur en procédant à un étalonnage de l'atelier de traitement et de l'organisation de chantier.

☛ c. Le réglage final

Cette opération est également à exécuter dans tous les cas de chantier. Elle a pour objet d'enlever et d'évacuer la surépaisseur laissée, sur toute la surface de la couche, à l'issue du compactage partiel.

Elle doit être exécutée le plus rapidement possible après le compactage partiel pour rester dans la plage des deux tiers du délai de maniabilité.

Les tolérances de nivellement à rechercher sont en général de ± 3 cm, mais pour les gros chantiers, notamment autoroutiers, et pour des sols traités dont le D_{\max} n'excède pas 50 mm, la recherche d'une valeur de ± 2 cm (voire ± 1 cm avec des sols fins) est réaliste compte tenu des ateliers de réglage généralement utilisés (autogrades, niveleuses guidées sur fil ou par laser et vraisemblablement par GPS dans un proche avenir).

Le réglage.

Une opération délicate qui s'exécute en deux séquences
préréglage et réglage final séparées par l'opération de compactage partiel



Lorsque le lieu de fabrication du mélange est différent de celui de sa mise en œuvre, il est avantageux, notamment pour sauvegarder au maximum le délai de maniabilité, de grouper, en une même opération, régalaie et préréglage. Dans ce cas, l'utilisation de bouteurs guidés par « plan laser » constitue souvent une bonne solution.



Le réglage final exige un rabotage de la totalité de la surface de la couche. Sur la photo, il est réalisé à l'aide d'une niveleuse guidée par « plan laser ». Le matériau raboté est rassemblé en cordon et repris par une décapeuse auto-chargeuse (visible en arrière-plan).



Pour les gros chantiers, l'utilisation de gros autogrades (plus de 7 m de largeur) guidés sur fil garantit productivité et qualité du nivellement.



Dernier né issu de la technologie spatiale, le dispositif de guidage par mesure GPS différentielle équipant une raboteuse de 6 m de largeur de coupe en cours de réglage final d'une couche de forme en craie à silex traitée avec un liant spécial routier (à remarquer l'absence de toute implantation géométrique au sol).



État de la plate-forme après rabotage à l'aide de la raboteuse guidée par GPS ; reprise et évacuation du matériau raboté.



Détail du pupitre de contrôle installé dans la cabine de la raboteuse (le trait incliné noir représente le profil théorique à réaliser à l'endroit où se trouve la raboteuse et le trait rouge le positionnement de l'arête de la lame de coupe de la raboteuse).

① Hors considération des possibilités des systèmes de guidage par GPS (du fait de leur mise au point encore trop récente).

● 2.7.3. Les ateliers de réglage

Ils sont actuellement constitués par :

- des niveleuses classiques guidées manuellement à l'aide de nivelettes,
- des niveleuses guidées électroniquement par fil et capteur de proximité ou par plan laser,
- des engins spécifiques tels que des autogrades guidés électroniquement par fil ou plan laser qui peuvent réaliser simultanément régalaie/répartition, pré-régalaie, mise en cordon et ramassage-chargement du matériau excédentaire.

Le choix de l'atelier dépend de l'importance du chantier et des sujétions topographiques du projet, comme indiqué dans le tableau C2-II.

TABLEAU C2-II
Choix et rendements indicatifs des ateliers de réglage fin en fonction de la nature d'ouvrage ①

Nature d'ouvrage	Matériels généralement appropriés	Rendements journaliers indicatifs (8 h d'activité)
Section autoroutière ou ferroviaire courante	Niveleuse + équipement laser ou guidage par fil ou, si possible, autograde guidé par fil	8 000 à 12 000 m ²
Piste d'aérodrome	Niveleuse + équipement laser ou guidage par fil ou, si possible, autograde guidé par fil	6 000 à 10 000 m ²
Section autoroutière ou ferroviaire à grand rayon	Niveleuse guidée par fil ou, si possible, autograde guidé par fil	4 000 à 10 000 m ²
Plate-forme industrielle	Niveleuse + équipement laser	2 500 à 5 000 m ²
Taxi-Way	Niveleuse + équipement laser ou guidage par fil	2 000 à 4 000 m ²
Moyens et petits chantiers routiers Bretelle d'échangeur	Niveleuse + nivelettes ou, si possible, niveleuse guidée par fil	1 000 à 2 000 m ²
Voie étroite ou travaux sous circulation alternée	Niveleuse + nivelettes	500 à 2 000 m ²
Raccordements de chaussées	Niveleuse + nivelettes	500 à 1 000 m ²

■ 2.8. Cloutage

Le cloutage est indispensable sur les plates-formes de couches de forme en sols fins traités (classes A, et éventuellement C₇Ai, B₅, B₆, R₁₂, R₁₃) appelées à supporter des trafics intenses (à partir d'une agressivité de niveau 2, tel que défini dans le tableau C2-IV). Son rôle est de permettre l'accrochage de la protection superficielle lourde (enduit mono, voire bicouche) qui devra nécessairement être réalisée pour supporter ce trafic. Indépendamment de ce rôle, le cloutage s'avère également très avantageux, sur ces matériaux, pour améliorer l'accrochage entre couche de forme et couche de fondation en matériaux liés (avec un liant hydraulique aussi bien qu'hydrocarboné).

Cette opération consiste à épandre et à enchâsser sur la plate-forme, après réglage final et compactage final (cf. fig. C2-1a), des gravillons de coefficient Los-Angeles inférieur ou égal à 35, concassés, de gros calibre tels que 14/20 mm, voire plus, à raison de 5 à 7 kilogrammes par mètre carré.

L'enchâssement doit être exécuté avant la fin du délai de maniabilité par deux à trois passes d'un cylindre lisse fonctionnant sans vibrer, de la classe V₁ au minimum, ou mieux à l'aide d'un rouleau à pneus de la classe P₂ au minimum. L'enchâssement peut être facilité par une pulvérisation d'eau sur la plate-forme (# 1 l/m²) immédiatement avant le cylindrage. Les gravillons doivent couvrir entre 60 et 90 % de la surface de la plate-forme et être enchâssés sur environ la moitié de leur diamètre.

Remarque. *Le cloutage se distingue des techniques de protection superficielle développées ci-après, d'une part, parce qu'il doit être réalisé dans le délai de maniabilité, afin que les « clous » puissent être suffisamment enchâssés avant prise et retenus dans le matériau après prise et, d'autre part, parce qu'il ne peut prétendre avoir une quelconque efficacité vis-à-vis de la maîtrise de l'état hydrique du mélange durant sa prise.*

2.9. Protection superficielle

Toutes les couches de forme en sols traités doivent recevoir une protection superficielle. Sa nature dépend des rôles qui lui ont été dévolus, des natures de matériaux traités, des sollicitations mécaniques et climatiques supportées.

2.9.1. Rôles pouvant être dévolus à la protection superficielle

a. Dans tous les cas

La protection superficielle doit :

- maintenir l'état hydrique du matériau traité constituant la couche de forme (protection aussi bien vis-à-vis des infiltrations que de l'évaporation), durant la période de prise hydraulique du sol traité,
- favoriser l'accrochage entre couche de forme et couche de fondation.

b. Dans le cas fréquent

où la couche de forme est destinée à supporter un trafic de chantier

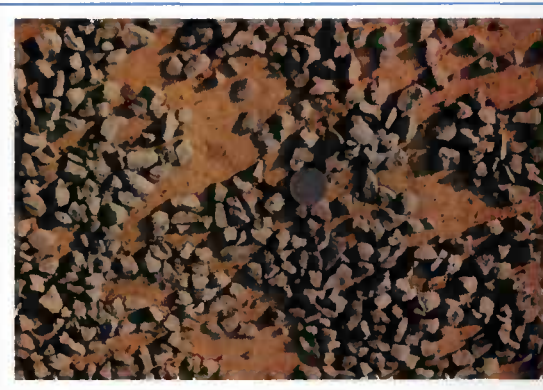
La protection superficielle doit, en plus, assurer :

- une augmentation sensible de la résistance de la plate-forme aux efforts tangentiels communiqués par les pneumatiques ainsi qu'une réduction de la glissance en cas de pluie (rôle similaire à celui du cloutage),
- une réduction des émissions de poussières par les engins de transport.

2.9.2. Différentes natures de protections superficielles

Les principales natures de protection superficielle pour lesquelles on dispose d'une expérience significative sont recensées et décrites dans la figure C2-3. Elles sont, pour la plupart, issues de la technique des enduits superficiels [12].







Le cloutage.
Une opération indispensable sur les couches de forme en sols fins traités



Le cloutage est réalisé avec des gravillons concassés, durs et de gros calibre 14/20 mm en général. Le taux de recouvrement de la surface doit être compris entre 60 et 90 %.



Les clous doivent être enchâssés dans le sol traité sur environ la moitié de leur diamètre par compactage avec un rouleau lisse ou à pneus réalisé dans le délai de maniabilité du mélange.

Appellation - Schéma	Formulation (par m ²)	Commentaires
Pulvérisation d'eau (P) 	1 à 2 litres d'eau éventuellement additionnée d'un produit hydrophile (Cl2 Ca)	Nécessité de répandre l'eau sous forme finement pulvérisée. Opération à renouveler dès que la surface s'est asséchée et qu'il y a à nouveau formation de poussières.
Enduit de cure par voile d'émulsion (EC) 	0,5 à 0,8 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Le sable peut être utilisé uniquement en l'absence de trafic lourd sur la couche de forme (cf. tableau C2-VII).
Enduit de scellement (ES) 	0,8 à 1,1 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Protection similaire à (EC) mais plus efficace contre la dessiccation si la durée d'exposition est importante. (cf tableau C2-VI)
Enduit monocouche (EM) 	1,3 à 1,6 kg d'émulsion* + 7 à 8 litres de gravillons 4/6** ou 9 à 10 litres de gravillons 6/10**	Le choix du gravillon dépend de l'agressivité du trafic. Le taux d'émulsion peut être augmenté de 5 à 10 % suivant la rugosité du support.
Enduit bicouche (EB) 	1re couche : 1,1 à 1,3 kg d'émulsion* 10 à 11 litres de gravillons 10/14** 2e couche : 1,5 kg d'émulsion* 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	L'ajustement de la quantité d'émulsion de la première couche doit être réalisé en fonction de la rugosité du support.
Enduit prégravillonné (EP) 	8 à 9 litres de gravillons 10/14** + 2 kg d'émulsion* + 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	Cette protection est comparable à celle obtenue par l'application d'un enduit monocouche sur une plate forme préalablement cloutée.

* Masse surfacique donnée pour une émulsion cationique à 65 % de bitume
 ** Les gravillons doivent avoir un coefficient Los-Angeles ≤ 35 et une propreté ($\% \leq 0,08 \text{ mm}$) $\leq 2\%$

Figure C2-3. Différentes protections superficielles pouvant être appliquées sur une couche de forme en sol traité.

Exemple de protection superficielle lourde de type « enduit prégravillonné ».

On distingue successivement :

- à l'arrière-plan, la bande cloutée,
- au centre, le répandage de l'émulsion sur la bande préalablement cloutée,
- enfin, au premier plan, l'épandage des gravillons.



● 2.9.3. Fonctions remplies par les différentes natures de protection superficielle

Elles sont récapitulées dans le tableau C2-III.

TABLEAU C2-III
Fonctions et efficacité des différentes natures de protections superficielles

Nature de la couche de la protection superficielle	Fonction(s) pouvant être assurée(s)	Degré d'efficacité					
		Protection mécanique	Protection évaporation	Protection infiltration	Émission poussières	Accrochage Assise bitumineuse	Assise hydraulique
Pulvérisateur d'eau (P)	Protection de l'état hydrique vis-à-vis des pertes d'eau par évaporation + Limitation des émissions de poussières sous circulation	⊕	◇	⊕	+	⊕	◇
Enduit de cure par voile d'émulsion (EC)	Protection de l'état hydrique vis-à-vis des pertes d'eau par évaporation + Réduction sensible des entrées d'eau par infiltration + Suppression des émissions de poussières	+	+	+	◇	◇	+
Enduit de scellement (ES)	Idem « Voile d'enduit de cure » + Légère augmentation de la résistance de la plate-forme aux efforts tangentiels induits par les pneumatiques	◇	◇	◇	⊕	◇	+
Enduit monocouche (EM)	Idem « Enduit de scellement », mais l'augmentation de la résistance de la plate-forme aux efforts tangentiels induits par les pneumatiques est nettement plus élevée	◇	◇	◇	⊕	⊕	+
Enduit bicouche (EB)	Idem « Enduit monocouche », mais avec efficacité et durabilité plus grandes	⊕	⊕	⊕	*	*	◇
Enduit prégravillonné (EP)	Idem « Enduit bicouche », mais cette nature de protection s'adapte mieux à des supports en matériaux hétérogènes	*	⊕	⊕	*	*	◇

* Très efficace
 ⊕ Efficace
 ◇ Moyennement efficace
 + Efficacité variable
 ⊕ Inefficace

● 2.9.4 Sollicitations à considérer

Entre la fin de sa mise en œuvre et son recouvrement par la couche de fondation, une couche de forme est, suivant les chantiers, soumise à des sollicitations de nature, de durée et d'intensité différentes.

Les plus importantes proviennent du trafic et du climat qu'elle devra supporter durant cette période.

☛ a. Le trafic

On peut proposer un classement par ordre croissant de l'agressivité du trafic supporté par une couche de forme, comme indiqué dans le tableau C2-IV.

☛ b. Le climat et la durée d'exposition

Comme pour le trafic, on peut proposer un classement des niveaux d'exposition par ordre croissant de sévérité, comme indiqué dans le tableau C2-V.

TABLEAU C2-IV
Niveaux d'agressivité du trafic supporté par une couche de forme

Niveau d'agressivité du trafic	Type de trafic correspondant
A	Trafic léger, limité aux voitures
B	Trafic léger et trafic lourd nécessité par les travaux annexes (trafic lourd \leq à 500 passages de poids lourds lourds)
C	Trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation ou Trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de forme
D	Trafic d'approvisionnement des matériaux de la couche de forme et des matériaux de la couche de fondation + Sujétions exceptionnelles (telle que piste de chantier pour engins de terrassement)

TABLEAU C2-V
niveaux d'exposition climatiques supportés par une couche de forme avant son recouvrement par la couche de fondation

Niveau d'exposition	Saison	Durée d'exposition
0	Indifférente	\leq une semaine
1	Printemps-été	\leq un mois
2	Printemps-été	$>$ un mois
3	Arrière-saison	$>$ une semaine
4	Arrière-saison et hiver	$>$ une semaine

● 2.9.5. Choix de la nature de protection superficielle en fonction des particularités du chantier

Suivant les niveaux d'agressivité du trafic et d'exposition tels que définis précédemment, l'expérience actuelle conseille la réalisation des types de protection superficielle indiqués dans le tableau C2-VI.

TABLEAU C2-VI
Propositions de protection superficielle à appliquer en fonction des niveaux d'agressivité du trafic et d'exposition

Niveau d'agressivité du trafic	Niveau d'exposition climatique				
	0	1	2	3	4
A	P ou EC *	EC avec sablage	EC avec sablage	ES avec sablage	ES avec sablage
B	P ou EC *	EC avec gravillonnage	ES avec gravillonnage	ES avec gravillonnage	ES avec gravillonnage
C	EC	ES	EM	EM	EM
D	ES	EM	EM	EM ou EP ☉	EB ou EP ☉

P Pulvérisation d'eau
EC Enduit de cure
ES Enduit de scellement
EM Enduit monocouche
EB Enduit bicouche
EP Enduit prégravillonné
 * Un enduit de cure est appliqué si la couche de fondation est traitée au bitume et/ou si la tenue à l'immersion au jeune âge du mélange est limitée
 ☉ Lorsque le support est hétérogène

Il faut, par ailleurs, respecter les règles pratiques suivantes :

- une pulvérisation d'eau est indispensable préalablement à toute application d'une protection à base d'émulsion de bitume ;
- Lorsqu'une protection lourde (enduit bicouche ou prégravillonné) est prévue, elle est généralement réalisée en deux temps. On réalise tout d'abord, au fur et à mesure de la construction de la plate-forme, une protection provisoire, légère, telle que pulvérisation d'eau ou cure par voile d'émulsion, voire un enduit de scellement. Lorsque la réalisation de la protection définitive est décidée plusieurs jours voire semaines après le traitement, en particulier lorsque la protection provisoire a été limitée à une pulvérisation d'eau, il est presque toujours nécessaire de procéder, préalablement à son application, à un balayage, ou mieux une aspiration des poussières de surface, suivi d'une pulvérisation d'eau.



Page laissée blanche intentionnellement

Assurance de la qualité



1. Définition de la qualité requise 147

- 1.1. Formulation des stipulations 147
- 1.2. Stipulations à formuler dans le DCE et indications pouvant être demandées dans le SOPAQ 148
- 1.3. Cas particulier des stipulations relatives aux performances mécaniques de la plate-forme 152
- 1.4. Stipulations complémentaires résultant des options autorisées dans le DCE 153

2. Les actions d'assurance de la qualité 156

- 2.1. Établissement du Plan d'assurance de la qualité du chantier (PAQ) 156
- 2.2. Établissement de l'esquisse du Schéma directeur de la qualité et du Schéma directeur de la qualité (SDQ) 157
- 2.3. Plan de contrôle 157
- 2.4. Points d'arrêt 162
- 2.5. Convenance 164
- 2.6. Anomalies 165
- 2.7. Synthèse des actions d'assurance de la qualité 166

Résumé

Les stipulations traduisant la « qualité requise » d'une couche de forme en sol traité sont constituées, d'une part, de spécifications, portant sur des valeurs à obtenir (notamment des performances mécaniques) et, d'autre part, de prescriptions, portant sur les méthodes et les moyens à mettre en œuvre.

Par ailleurs, l'application des principes de la démarche de l'assurance de la qualité prévoit la possibilité d'interroger les soumissionnaires sur les méthodes et les moyens qu'ils prévoient d'utiliser pour réaliser certains aspects de l'exécution de cette tâche, sur lesquels le prescripteur n'a pas jugé opportun d'imposer de stipulations au stade de l'appel d'offres. Ces moyens et méthodes sont à présenter par le soumissionnaire dans le Schéma organisationnel du plan d'assurance de la qualité (SOPAQ) qu'il prévoit d'appliquer sur le chantier.

Enfin, dans le cas des marchés de couches de forme en sols traités, il peut être justifié de laisser aux soumissionnaires la possibilité de présenter des offres à partir de choix (sur la nature des produits de traitement, sur les gisements des sols à réserver pour le traitement, sur le mode de fabrication du mélange, sur le niveau des performances visé, etc.) différents de ceux retenus dans la solution de base, étant entendu qu'une offre pour cette solution doit néanmoins toujours être exigée afin de comparer les soumissions et de disposer d'une solution alternative, si nécessaire.

■ **La première partie** de ce chapitre analyse la nature des stipulations à formuler dans le CCTP et les aspects pour lesquels il est généralement préférable de laisser des choix aux soumissionnaires. Ces éléments sont présentés pour quatre cas types de marché qui diffèrent par le niveau de liberté laissé dans les choix des paramètres définissant le traitement.

■ **La seconde partie** du chapitre développe, en cohérence avec les principes de l'assurance de la qualité, les différentes facettes de la **vérification des exigences de qualité requise formulées dans le marché** en analysant successivement les aspects suivants :

- *objet et consistance des différents documents sur lesquels s'appuie la démarche : Plan d'assurance de la qualité (PAQ), Schéma directeur de la qualité (SDQ), Plan de contrôle, etc.,*
- *différentes actions prévues dans le Plan de contrôle et le stade d'avancement de l'ouvrage où elles doivent être exécutées,*
- *points d'arrêt normalement prévisibles,*
- *opérations permettant de prononcer la convenance des produits, des moyens, des méthodes et des résultats,*
- *dispositions à prendre, face aux anomalies éventuelles constatées,*
- *contenu de la synthèse des actions de contrôle à intégrer dans le dossier de récolement de l'ouvrage.*

Ce chapitre a été rédigé en cohérence avec les principes développés dans le Guide technique « Organisation de l'assurance de la qualité dans les travaux de terrassement », SETRA-LCPC, 1999.

1. Définition de la qualité requise

■ 1.1. Formulation des stipulations

La qualité requise pour une couche de forme en sol traité est définie, dans le Dossier de consultation des entreprises (DCE), à partir de stipulations exprimées sous la forme de spécifications portant sur les matériaux à traiter, sur les produits de traitement, sur les valeurs de performances mécaniques du sol traité, sur l'épaisseur de la couche traitée, etc.

Ces spécifications sont, par ailleurs, complétées par des prescriptions portant sur les méthodes d'exécution et les moyens à utiliser.

La particularité essentielle de la technique du traitement des sols avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques étant de pouvoir conférer à un matériau donné des performances mécaniques ajustables à une valeur visée en jouant sur la nature et les dosages des produits de traitement utilisés, il peut être justifié de laisser aux soumissionnaires la possibilité de présenter des offres à partir de choix différents de ceux envisagés dans la solution de base décrite dans le DCE. La nature des stipulations et leur répartition entre spécifications et prescriptions dépendent alors des choix laissés aux soumissionnaires pour les paramètres du traitement.

Le tableau C3-I distingue quatre cadres-types de marché, classés selon un niveau croissant des choix laissés aux soumissionnaires.

□ Cadre-type 1

Dans le cadre-type 1, tous les paramètres du traitement sont imposés. Il doit être considéré comme celui devant, autant que possible, être retenu pour décrire la « solution de base » proposée à l'appel d'offres (en particulier, dans le cas des grands chantiers).

□ Cadre-type 2

Le cadre-type 2 laisse le choix des produits de traitement, des dosages et du mode de fabrication des mélanges. Il peut encore être envisagé comme constituant une « solution de base » étant donné que les matériaux à traiter, la classe mécanique et l'épaisseur de la couche de forme sont imposés et que, de ce fait, une comparaison des offres reste possible.

□ Cadres-types 3 et 4

En revanche, les cadres-types 3 et 4 doivent être considérés comme des variantes autorisées dans l'appel d'offres et, si le maître d'œuvre décide de retenir une offre établie dans ce sens, il doit également en exiger une autre pour la « solution de base » décrite dans l'appel d'offres (conformément au cas de cadre-type 1 ou éventuellement 2) afin de disposer d'une solution alternative, si nécessaire.

TABLEAU C3-I

Différentes options pouvant être envisagées lors de l'établissement du DCE et du marché

Cadres-types de marché pouvant être envisagés *	Paramètres de traitement Imposés dans le DCE	Paramètres laissés au choix du soumissionnaire
1	<ul style="list-style-type: none"> - Produit(s) de traitement - Dosage - Matériau(x) à traiter - Mode de fabrication du mélange - Épaisseur de la couche de forme 	Aucun
2	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau(x) à traiter - Classe mécanique du matériau traité - Épaisseur de la couche de forme 	<ul style="list-style-type: none"> - Produit(s) de traitement - Dosage - Mode de fabrication du mélange
3	Classe de la plate-forme	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau(x) à traiter - Produit(s) de traitement et dosage(s) - Mode de fabrication du mélange - Classe mécanique du matériau traité - Épaisseur de la couche de forme
4	Aucun (cas particulier où le soumissionnaire est autorisé à proposer une optimisation de la structure PST-couche de forme-assises)	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau(x) à traiter - Produit(s) de traitement et dosage(s) - Mode de fabrication du mélange - Classe mécanique du matériau traité - Épaisseur de la couche de forme - Classe de la plate-forme

* Des cadres types intermédiaires entre ceux proposés peuvent aussi être envisagés, comme, par exemple, un cadre 1 bis où seul le choix du mode de fabrication du mélange ne serait pas stipulé ; mais, pour la clarté de l'exposé, on se limitera aux quatre cas présentés qui représentent les situations majoritairement rencontrées. De toute manière, tout type de cas peut être plus ou moins complètement analysé à partir des éléments présentés dans les tableaux C3-II et C3-III

Par ailleurs, la complexité de la technique fait que de nombreux aspects, importants vis-à-vis de la qualité de l'ouvrage, ne peuvent pas être complètement définis par des stipulations formulées dans les pièces du DCE (parce que dépendant des moyens et des méthodes d'exécution qui seront utilisés et souvent mal connus à ce stade). Pour ces aspects, il est alors recommandé, en accord avec les principes de l'assurance de la qualité, de demander aux soumissionnaires de présenter les dispositions qu'ils prévoient d'appliquer pour les traiter.

Les points sur lesquels peuvent porter ces dispositions sont à préciser dans le DCE (en principe, dans le Règlement de consultation (RC)), et les réponses attendues des soumissionnaires sont à présenter dans le Schéma organisationnel du plan d'assurance de la qualité (SOPAQ) accompagnant leur offre. Après ajustement éventuel durant la mise au point du marché, ces dispositions engagent l'adjudicataire au même titre que les stipulations.

■ 1.2. Stipulations à formuler dans le DCE et indications pouvant être demandées dans le SOPAQ

Une liste-type des stipulations pouvant éventuellement être imposées ainsi que des indications pouvant être demandées dans le SOPAQ est proposée dans le tableau C3-II pour le cas où le DCE a imposé l'ensemble des paramètres définissant le traitement (cadre-type de marché 1). Parmi les éléments de cette liste, il appartient au rédacteur du DCE de retenir ceux qu'il juge les plus pertinents, eu égard aux particularités du chantier concerné.

TABLEAU C3-II

Stipulations à prescrire dans le DCE et propositions pouvant être demandées dans le SOPAQ pour un marché où tous les paramètres définissant le traitement sont imposés

Aspects à considérer	Stipulation(s) pouvant éventuellement être imposée(s) dans le DCE	Commentaires	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
Produits de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - Nature(s) et dosage(s) du (des) produit(s) de traitement à appliquer - Règles fixant le dosage en chaux en fonction de l'état hydrique du sol (dans le cas du traitement mixte d'un sol sensible à l'eau et humide) 	<p>Ces éléments doivent résulter, autant que possible, d'une étude de traitement ou, si justifié, être fixés <i>a priori</i> (cf. § C1-2.2.)</p> <p>Pour définir ces règles, on pourra s'inspirer des éléments donnés dans les tableaux B-I, B-II et la figure C1-2</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Identification du (des) fournisseur(s) du (des) produit(s) de traitement - Dans le cas des LSR : fourniture du (ou des) avis technique(s) du (ou des) produit(s) de traitement proposé(s) et des éléments du PAQ du producteur jugés pertinents pour le chantier considéré - À défaut d'avis technique, fourniture de la fiche des caractéristiques d'identification et de performances délivrée par le fabricant
Nature, état, localisation des sols devant être traités	<ul style="list-style-type: none"> - Plages des caractéristiques de nature et d'état acceptées pour les matériaux à traiter - Localisation des gisements de matériaux à réserver pour le traitement 	<p>Les plages de caractéristiques de nature et d'état des matériaux destinés à être traités sont à fixer par référence aux § C1-1.3. et C1-3.4.</p> <p>La stipulation de la localisation des gisements à réserver pour le traitement implique une reconnaissance géotechnique fiable et une prise en compte rigoureuse dans le mouvement des terres et le planning</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Principe de la méthode et nature des matériels qui seront utilisés pour réaliser la préparation des sols (épierrement, tri homogénéisation, humidification, etc.) - Dispositions particulières, notamment la composition des ateliers d'extraction, prévues pour exploiter les gisements - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer un mouvement de terres conforme à la localisation des gisements
Arase des terrassements	<ul style="list-style-type: none"> - Valeurs de nivellement et de portance (la possibilité de satisfaire ces exigences doit avoir été étudiée au niveau du projet et du marché de terrassement) - Mode de correction éventuelle de la portance 	<p>La portance minimale de l'arase pour permettre la réalisation d'une couche de forme en sol traité est de 35 MPa (cf. GTR)</p> <p>Les tolérances de nivellement généralement admises pour l'arase de terrassement sont de ± 5 cm</p> <p>Le mode de correction peut être des purges ou un traitement à la chaux vive de l'arase sur une épaisseur de 30 à 40 cm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Stratégie générale du mouvement des terres et du planning prévue pour satisfaire les exigences de portance et de nivellement de l'arase
Stockage du (ou des) produit(s) de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - Une capacité de stockage en silos étanches correspondant à X j de travail à la cadence moyenne prévue - Lieu d'implantation de la zone de stockage et dispositions de protection de l'environnement particulières aux abords de la zone de stockage 	<p>X est en général d'une journée (exceptionnellement 2 j si cela est justifié par la nécessité de garantir les approvisionnements)</p> <p>Ces stipulations ne sont à imposer que si les contraintes d'environnement les exigent (chantier « sensible »)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsqu'il n'est pas spécifié de capacité de stockage, indication de l'organisation prévue pour garantir l'approvisionnement du (ou des) produit(s) de traitement en quantité et en temps voulu - Lorsque la zone de stockage n'est pas imposée, indication du choix fait par l'entreprise et justifications correspondantes

TABLEAU C3-II (suite)

Aspects à considérer	Stipulation(s) pouvant éventuellement être imposée(s) dans le DCE	Commentaires	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
Épandage (sans objet si le traitement en centrale est imposé)	Caractéristiques de l'épandeur : - coefficient de variation - exactitude - plage de débits surfaciques possible (en kg/m ² par passe) Dispositifs particuliers exigés pour le chantier considéré	- Pour le coefficient de variation à exiger, on admettra en général $\leq 10\%$ - Pour l'exactitude, on admettra en général une tolérance de $\pm 5\%$ de la valeur donnée par l'étude de formulation - Pour la plage de débit surfacique, on retiendra autant que possible les valeurs maximale et minimale de la masse par mètre carré envisagées pour le chantier considéré - Les dispositifs particuliers pouvant être imposés pour augmenter la précision de l'épandage sont, par exemple, largeur d'épandage variable, alarme en approche de fin de vidange et arrêt instantané de l'épandage, dispositif de pesée de la cuve de stockage	- Fourniture des fiches techniques des matériels prévus - Références de résultats obtenus avec ces matériels sur des chantiers récents et similaires - Grandes lignes de la procédure d'exécution - etc. - Dispositifs particuliers prévus sur les épandeurs en vue d'améliorer leur précision (en plus de ceux éventuellement imposés dans le CCTP)
Malaxage en place (sans objet si le traitement en centrale est imposé)	Pulvérisateur de sols à rotor horizontal Profondeur de malaxage Finesse de mouture Dispositifs particuliers exigés pour le chantier considéré	- La profondeur de malaxage maximale de la majorité des pulvérisateurs à rotor horizontal est de l'ordre de 0,30 m - Une valeur maximale du D ₉₅ de la fraction fine de la mouture est à stipuler dans le cas général. On peut envisager : 20 à 30 mm lorsque cette mouture se classe en A ₂ et 30 à 40 mm lorsqu'elle se classe en A ₃ . Des valeurs plus faibles (jusqu'à 5 mm) peuvent être stipulées sur des sols fins peu ou pas argileux (sols des classes A ₁ , B ₁ , D ₁ , etc.) - Un dispositif particulier pouvant éventuellement être imposé est la possibilité d'incorporer directement de l'eau dans la chambre de malaxage	- Fourniture des fiches techniques des matériels prévus - Références de résultats obtenus avec ces matériels sur des chantiers récents et similaires - Indication du nombre de passes de malaxeur prévu pour atteindre la finesse de mouture exigée - Grandes lignes de la procédure d'exécution - Dispositifs particuliers prévus sur les malaxeurs (en plus de ceux éventuellement imposés dans le CCTP)
Traitement en centrale (le traitement en centrale peut toujours être envisagé car, sauf exception, il n'y a jamais lieu d'imposer le traitement en place)	Niveau de la centrale Doseurs pondéraux pour l'alimentation des sols Systèmes d'acquisition continue des quantités des différents constituants du mélange Débit nominal horaire	Le traitement en centrale ne doit être imposé que si l'étude a démontré l'intérêt de cette technique pour le chantier considéré, et que l'on dispose par expérience d'une bonne assurance de faisabilité du mélange (pour le sol et le liant considérés) Une centrale de niveau 2 est à demander en général Des doseurs pondéraux sont généralement à exiger dans le cas des sols sensibles à l'eau (VB _S \geq 0,2 g) À fixer en relation avec les délais de réalisation du chantier	- Description sommaire des éléments constitutifs de la centrale - Description des équipements anti-bourrage éventuels - Références de résultats obtenus avec ces matériels sur des chantiers récents et similaires - Systèmes d'acquisition (s'ils ne non pas stipulés dans le CCTP) - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération

TABLEAU C3-II (suite)

Aspects à considérer	Stipulation(s) pouvant éventuellement être imposée(s) dans le DCE	Commentaires	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
Arrosage	Plage de variabilité de la teneur en eau du sol traité tolérée (mesurée avant compactage)	Les plages admissibles sont à fixer par référence aux résultats de l'étude (cf. § C1-3.4.)	- Nombre, caractéristiques (capacité, précision escomptée) des engins d'arrosage envisagés - Méthodologie envisagée pour le contrôle de cette opération
	Qualité de l'eau	La qualité de l'eau doit satisfaire la norme NF P 98-100 type 1 (éventuellement type 2 après étude spécifique)	
	Lieu de prélèvement (éventuellement)	Pour les cas de chantier le justifiant	- Lieu de prélèvement (s'il n'est pas imposé dans le CCTP)
	Dispositifs d'amélioration de la précision particuliers	Dans l'attente que des dispositifs permettant d'améliorer la précision des arroseuses tels que : débitmètre embarqué, système de maîtrise de la largeur d'arrosage, rampes d'aspersion déportée, etc. soient suffisamment répandus, il est préférable de demander des précisions sur ce point dans le SOPAQ, plutôt que de les imposer dans le CCTP	Dispositifs particuliers prévus sur les arroseuses en vue d'améliorer leur précision (en plus de ceux éventuellement imposés dans le CCTP)
Compactage	Pour ce qui concerne les exigences de compacité, deux types de spécifications peuvent être envisagés a. Exigences portant sur des taux de compactage b. Exigences portant sur les modalités d'utilisation des compacteurs	Si la compacité exigée est exprimée en taux de compactage, prescrire en général une valeur de la masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche $\geq 98,5\%$ de la $\rho_{D_{PN}}$ et une valeur de la masse volumique en fond de couche $\geq 96\%$ de la $\rho_{D_{PN}}$ Si la compacité est exprimée par référence aux modalités d'utilisation des compacteurs, prescrire les valeurs indiquées dans le GTR	- Constitution des ateliers de compactage (nombre et classement des engins) - Fourniture des fiches techniques de engins prévus - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération
	Compacteurs spécifiques éventuels	Des compacteurs spécifiques (rouleaux à pneus, etc.) peuvent être imposés dans le CCTP, si nécessaire (cf. § C2-2.5.)	Nombre, type et fonctions des compacteurs spécifiques envisagés
Réglage	Tolérances de nivellement de la plate-forme support de chaussée	Les tolérances généralement admises pour une plate-forme support de chaussée sont de ± 3 cm, mais dans le cas des couches de forme en sols fins traités, des tolérances de ± 2 cm (voire ± 1 cm) peuvent normalement être respectées sur les chantiers utilisant des engins de réglage à guidage automatique	- Grandes lignes de la procédure d'exécution (ateliers utilisés, ordonnancement des opérations élémentaires, etc) envisagée pour satisfaire les spécifications (cf. § C2-2.7.) - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération
	Réalisation du réglage final par rabotage d'une certaine surépaisseur avec indication éventuelle des conditions de réutilisation du matériau raboté	Il est recommandé de stipuler une valeur minimale de l'épaisseur à raboter (5 cm en l'absence d'autres éléments), étant entendu que la valeur définitive sera décidée à l'appui de la planche de convenance	
	Épaisseur de la couche de forme et nombre de couches élémentaires la constituant	Il s'agit de l'épaisseur finale (mesurée après réglage final). Si le projet a prévu la réalisation de la couche de forme en une seule couche, il est important de le stipuler	

TABLEAU C3-II (suite et fin)

Aspects à considérer	Stipulation(s) pouvant éventuellement être imposée(s) dans le DCE	Commentaires	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
Cloutage	Granularité et résistance des granulats à utiliser, masses surfaciques à épandre	Les valeurs à prescrire sont à fixer par référence au § C2-2.8.	- Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération
Protection superficielle	Nature et formulation de la protection superficielle à appliquer Délai maximal séparant la fin du traitement de l'application de la protection superficielle	Les principaux éléments relatifs au choix de la nature, de la formulation et du délai d'application de la protection superficielle sont à fixer par référence au § C2-2.9.	- Composition des ateliers prévus pour la réalisation de la protection superficielle - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération
Performances mécaniques de la plate-forme	Délai d'attente avant ouverture au trafic de chantier dans le cas de traitement avec un liant hydraulique Valeurs de la déformabilité mesurée X_j après réalisation de la couche de forme.	Ce délai doit correspondre à l'obtention d'une $R_c \geq 1\text{MPa}$ tel que déduit de l'étude de formulation (cf. § C1-3.6.2.) Cf. § C3-1.3. ci-après	
Protection de l'environnement	Vitesse du vent conduisant à l'arrêt du traitement Dispositions spécifiques applicables aux chantiers « sensibles »	cf. annexe 5 cf. annexe 5 + dispositions complémentaires éventuelles résultant de la spécificité du chantier	- Présentation des dispositions de toutes natures prévues pour protéger l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération

■ 1.3. Cas particulier des stipulations relatives aux performances mécaniques de la plate-forme

❶ Ces corrections peuvent toutefois ne pas être nécessaires si l'on peut justifier que l'effet différé du traitement conduira à long terme à une augmentation suffisante des caractéristiques mécaniques de la plate-forme, mais cette justification doit pouvoir être présentée (âge de la couche traitée en relation avec la cinétique de prise du liant, par exemple). Dans le cas contraire, des dispositions correctives doivent être mise en œuvre (purges, révision du dimensionnement, etc.).

Pour définir ces corrections et apprécier qui doit en supporter la charge, une expertise est alors le plus souvent nécessaire.

Dans le cadre-type de marché 1, la déformabilité de la plate-forme n'a pas, en principe, à être imposée. En effet, tous les paramètres définissant le traitement étant fixés (sol, produit de traitement, dosage, épaisseur de la couche de forme, etc.), le respect des stipulations doit assurer l'obtention de la déformabilité recherchée. Il convient néanmoins de la vérifier lors de la réception de la couche de forme (ou, au plus tard, lors de la mise en œuvre de la couche de fondation) car, si elle se trouvait être supérieure à la valeur attendue à long terme, il serait nécessaire de procéder aux corrections nécessaires ❶.

En revanche, lorsque le choix de certains paramètres du traitement comme le produit de traitement, le sol à traiter, la classe de plate-forme, etc. est laissé au soumissionnaire (cas des marchés relevant des cadres-types 2, 3 et 4), les valeurs de la déformabilité de la plate-forme doivent toujours être stipulées, comme indiqué dans le tableau C3-III.

La déformabilité est vérifiée principalement à l'aide de mesures de déflexion sous essieu de 130 kN au plus tôt 28 j après la mise en œuvre. Les valeurs à obtenir sont, à défaut d'autres éléments, celles proposées dans le tableau C3-III dans le cas du cadre-type de marché 2.

1.4. Stipulations complémentaires résultant des options autorisées dans le DCE

Lorsque le DCE a laissé aux soumissionnaires des possibilités de choix sur tout ou partie des paramètres définissant le traitement de sol, une plus ou moins grande partie des stipulations définies dans le tableau C3-II n'a évidemment plus de justification mais, en contrepartie, les stipulations demeurant pertinentes doivent être complétées par des stipulations particulières qui dépendent du niveau de choix autorisé, comme indiqué dans le tableau C3-III.

À partir des considérations présentées dans les tableaux C3-II et C3-III, l'annexe 9 propose un cadre général d'aide à la rédaction des stipulations concernant la réalisation de couches de forme en sols traités.

TABLEAU C3-III

Stipulations complémentaires à prévoir lorsque des possibilités de choix sur tout ou partie des paramètres définissant le traitement de sol sont autorisées dans le DCE

Options envisagées	Stipulation(s) complémentaire(s) pouvant être imposée(s) dans le DCE	Mode d'évaluation technique de l'offre proposée	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)														
Cadre-type de marché 1	Sans objet (les stipulations correspondantes sont celles indiquées dans le tableau C3-II)																
Cadre-type de marché 2	- Origine et nature des produits de traitement																
	- Classe mécanique du matériau à obtenir - Classe de la plate-forme et les valeurs de sa déformabilité au moment de la mise en œuvre de la couche de fondation. À défaut d'autres éléments, les valeurs de la déformabilité à stipuler sont indiquées ci-dessous																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Classe de plate-forme visée</th> <th colspan="2">Déflexion maximale sous essieu de 130 kN (mm)</th> </tr> <tr> <th>Traitement à la chaux seule</th> <th>Traitement avec un liant hydraulique (éventuellement associé à la chaux)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PF₂</td> <td>1,2</td> <td>0,8</td> </tr> <tr> <td>PF₃</td> <td>0,8</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>PF₄</td> <td>-</td> <td>0,5</td> </tr> </tbody> </table>			Classe de plate-forme visée	Déflexion maximale sous essieu de 130 kN (mm)		Traitement à la chaux seule	Traitement avec un liant hydraulique (éventuellement associé à la chaux)	PF ₂	1,2	0,8	PF ₃	0,8	0,6	PF ₄	-	0,5
Classe de plate-forme visée	Déflexion maximale sous essieu de 130 kN (mm)																
	Traitement à la chaux seule	Traitement avec un liant hydraulique (éventuellement associé à la chaux)															
PF ₂	1,2	0,8															
PF ₃	0,8	0,6															
PF ₄	-	0,5															

TABLEAU C3-III (suite)

Options envisagées	Stipulation(s) complémentaire(s) pouvant être imposée(s) dans le DCE	Mode d'évaluation technique de l'offre proposée	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le cas où la solution de base a prévu un traitement en centrale et que l'entreprise propose un traitement en place, stipuler l'obligation à celle-ci de démontrer, sur une épreuve de convenance, l'obtention d'un mélange de qualité comparable à celle obtenue en centrale - Pour les petits chantiers : <ul style="list-style-type: none"> . fourniture par l'entreprise de références de chantiers comparables pleinement réussis (matériaux, produits de traitement, épaisseur de la couche de forme, sollicitations subies par la couche de forme similaires) - Pour les autres chantiers : <ul style="list-style-type: none"> . fourniture par l'entreprise d'une étude de traitement justificative. Cette étude doit être de même niveau que celle ayant conduit à la solution de base et, dans tous les cas, au moins de niveau 1 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise des résultats (ou éventuellement des premiers résultats) de l'étude de traitement fournie - Examen visuel des résultats obtenus lors de l'épreuve de convenance et, si nécessaire, mesure des caractéristiques d'homogénéité du mélange - Dans le cas des petits chantiers : expertise du bien-fondé des résultats présentés par l'entreprise 	<ul style="list-style-type: none"> - Justification du choix du traitement en place - Actions du contrôle intérieur envisagées
<p style="text-align: center;">Cadre-type de marché 3</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fourniture, par l'entreprise, d'une étude de reconnaissance géotechnique du gisement de matériau destiné à être traité, conduite comme indiqué au § C1-1 - Fourniture, par l'entreprise, d'une étude de traitement justificative au moins de niveau 2 - Classe de la plate-forme et en particulier les valeurs de sa déformabilité à la mise en œuvre de la couche de fondation (cf. valeurs proposées pour le cadre-type de marché 2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise de l'étude de reconnaissance du gisement - Expertise de l'étude de traitement justifiant les hypothèses de dimensionnement adoptées par l'entreprise pour retenir l'épaisseur de couche de forme aboutissant à la classe de plate-forme imposée 	<ul style="list-style-type: none"> - Origine et nature des produits de traitement choisis - Méthodes et moyens appliqués pour reconnaître et exploiter le gisement - Méthodes et moyens d'exécution envisagés - Actions du contrôle intérieur envisagées pour assurer la qualité de cette opération
<p style="text-align: center;">Cadre-type de marché 4</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fourniture, par l'entreprise, d'une étude de reconnaissance géotechnique du gisement de matériau destiné à être traité, conduite comme indiqué au § C1-1 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise de l'étude de reconnaissance du gisement 	<ul style="list-style-type: none"> - Origine et nature des produits de traitement choisis - Méthodes et moyens appliqués pour reconnaître et exploiter le gisement - Méthodes et moyens d'exécution envisagés - Références de chantiers permettant de valider la proposition

TABLEAU C3-III (suite et fin)

Options envisagées	Stipulation(s) complémentaire(s) pouvant être imposée(s) dans le DCE	Mode d'évaluation technique de l'offre proposée	Réponses devant être fournies dans le SOPAQ (si la question correspondante a été formulée dans le DCE)
	<p>- Par ailleurs :</p> <p>Si la proposition vise une classe de plate-forme déterminée suivant la méthode générale de classement définie dans le GTR ou suivant la méthode optimisant le couple « classe mécanique du matériau-épaisseur de la couche de forme » <i>cf.</i> figure C1-2, stipuler :</p> <ul style="list-style-type: none"> . la fourniture par l'entreprise d'une étude de traitement justificative de même niveau que celle ayant conduit à la solution de base et, dans tous les cas, au moins de niveau 2 . la classe de la plate-forme et, en particulier, les valeurs de sa déformabilité à la mise en œuvre de la couche de fondation (<i>cf.</i> valeurs proposées pour le cadre-type de marché 2) <p>Si la proposition vise un dimensionnement de l'ensemble « couche de forme-chaussée » par une méthode de calcul de structure, <i>cf.</i> figure C1-2, stipuler :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la fourniture par l'entreprise d'une étude de traitement de niveau 3 - la classe de la plate-forme et, en particulier, les valeurs de sa déformabilité à la mise en œuvre de la couche de fondation (<i>cf.</i> valeurs proposées pour le cadre-type de marché 2) - la mise en place d'une organisation de chantier ayant prévu la vérification, en cours d'exécution, des caractéristiques mécaniques prises comme hypothèses dans le dimensionnement - la nécessité, en cas d'anomalie, de procéder à la correction du dimensionnement de la structure par des dispositions agréées par le maître d'œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise de l'étude traitement ayant permis de justifier les hypothèses retenues pour l'épaisseur de couche de forme et la classe de plate-forme prévues - Expertise de la méthode et des hypothèses retenues pour définir les paramètres de la structure de chaussée proposée par l'entreprise (épaisseur de couche de forme classe de plate-forme, natures, caractéristiques mécaniques des matériaux, épaisseur des couches, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Actions du contrôle intérieur envisagées pour la vérification en cours d'exécution de l'obtention des caractéristiques visées, ainsi que les procédures de correction éventuelles

❶ Pour les chantiers importants, les terrassements peuvent déjà être largement avancés avant que le PAQ de la couche de forme traitée ne soit finalisé.

2. Les actions d'assurance de la qualité

■ 2.1. Établissement du Plan d'assurance de la qualité du chantier (PAQ)

En se référant aux dispositions générales annoncées dans son Manuel qualité et en conformité avec les dispositions figurant dans le SOPAQ (qui, après signature du marché, devient une pièce contractuelle), l'entreprise adjudicataire élabore, durant la phase de préparation du chantier et en concertation avec le maître d'œuvre, le PAQ qu'elle s'engage à appliquer ❶.

Ce travail consiste à mettre au point des procédures décrivant :

- l'organisation des épreuves de convenance prévues,
- la manière d'exécuter les différentes tâches élémentaires ayant une incidence sur la qualité de l'ouvrage (en particulier, la composition des ateliers utilisés),
- l'organisation de chantier prévue pour garantir l'ordonnancement correct des différentes tâches élémentaires,
- les modes de correction des anomalies éventuelles.

La formulation des procédures doit intégrer les particularités du chantier et prendre en considération notamment :

- la gestion des produits de traitement,
- le mode d'exploitation du (ou des) gisement(s) de matériaux destinés à être traités (mode d'extraction, stockage, tri, homogénéisation en nature et état, ajustement de l'état hydrique, etc.),
- le mode de fabrication du sol traité (en place ou en centrale),
- le mode de mise en œuvre du sol traité (approvisionnement, régilage, pré réglage, précompactage, réglage final, compactage final, application de la protection superficielle),
- la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières,
- etc.

Chaque procédure doit décrire :

- la méthode et les moyens utilisés pour la réalisation de la tâche élémentaire considérée,
- les actions sur lesquelles l'entreprise prévoit d'appliquer un contrôle intérieur et la consistance de ce contrôle (méthodologie appliquée, nature et nombre des mesures réalisées),
- les dispositions correctives prévues en cas d'anomalies constatées par le contrôle (intérieur ou extérieur).

Remarque. La mise au point du PAQ se termine en principe à l'issue des épreuves de convenance, mais son adaptation en cours de chantier (en cas de constatation d'anomalie, en particulier) doit être considérée comme normale.

■ 2.2. Établissement de l'esquisse du Schéma directeur de la qualité et du Schéma directeur de la qualité (SDQ)

L'esquisse du SDQ communiquée dans le DCE définit les grandes lignes de l'organisation que le maître d'œuvre entend mettre en place pour assurer la qualité de l'ouvrage.

Pour la réalisation d'une couche de forme en sol traité, ces grandes lignes peuvent, suivant le contexte du chantier, être dictées par le souci de :

- contrôler rigoureusement le processus d'exploitation du (ou des) gisement(s),
- gérer avec une rigueur particulière le mouvement des terres, le planning et la consommation des produits de traitement,
- réserver, au contrôle extérieur, l'exécution de certains contrôles dont les enjeux sur la qualité de l'ouvrage sont déterminants (épaisseurs, dosages, performances mécaniques, etc.),
- procéder, à titre de constatations, à différentes mesures non nécessairement prévues dans le marché, notamment celles des performances mécaniques dans le cas du cadre type de marché 1 (cf. § C3-1.3.) ①.

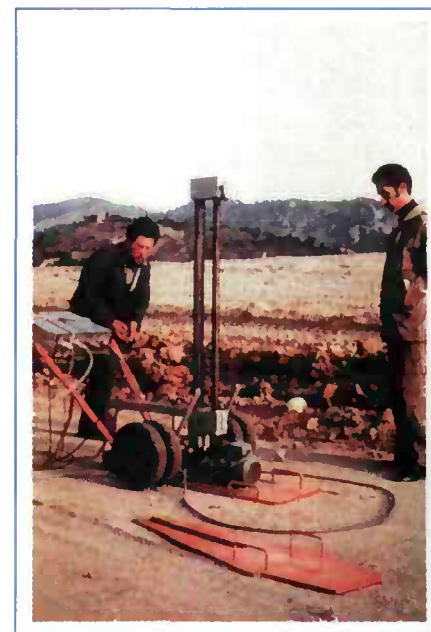
Durant la phase de préparation du chantier, le maître d'œuvre finalise le SDQ du chantier en le mettant en cohérence avec l'esquisse de SDQ et les intentions annoncées dans le PAQ de l'entreprise et dans les PAQ des sous-traitants et fournisseurs éventuels.

Ce document :

- coordonne l'ensemble des actions d'assurance de la qualité annoncées dans les PAQ et les complète par les actions que le maître d'œuvre a prévu de ne pas déléguer ou d'ajouter à celles de l'entreprise. Ces éléments sont rassemblés dans le Plan de contrôle (tableau C3-IV),
- établit la liste des situations qui seront considérées comme des points sensibles pour le chantier (tableau C3-V),
- définit les modalités de l'exécution des actions de contrôle ou des épreuves de convenance,
- précise certaines modalités spécifiques au chantier portant, par exemple, sur les organigrammes de la maîtrise d'œuvre et de l'entreprise (avec mention du niveau de décision attaché à chaque personne), les circuits de circulation des informations et les modalités de prise de décision, le planning d'exécution en fonction de la saison, la gestion du mouvement des terres, la procédure d'exploitation du gisement, le traitement d'interfaces sensibles (avec les travaux d'assainissement, par exemple), les conditions d'ouverture au trafic de la couche de forme, etc.

① Lorsque le choix des paramètres du traitement résultent d'une solution variante, les performances mécaniques finales doivent alors être imposées dans le marché et leur vérification assurée.

La vérification de la capacité en fond de couche à l'aide de la double sonde constitue une action pouvant être réalisée notamment lors de l'acceptation des méthodes et des moyens



■ 2.3. Plan de contrôle

Le Plan de contrôle définit :

- le programme des actions de contrôle et leur répartition entre contrôle intérieur et contrôle extérieur,
- les obligations des exécutants des contrôles en matière d'information (destination(s), délai, mode(s) de transmission, etc. des résultats des contrôles et des constatations).

Les différentes actions de contrôle faisant appel à des mesures et la (ou les) méthodologie(s) pour les exécuter sont indiquées dans le tableau C3-IV.

TABLEAU C3-IV
Différentes actions pouvant être envisagées dans le Plan de contrôle

Nature de l'action de contrôle	Consistance de l'action et stade d'avancement des travaux où elle doit être réalisée	Commentaires
<p>Vérification des caractéristiques des produits de traitement livrés (chaux, ciments, liants spéciaux)</p>	<p>Cette action est nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une part, pour décider l'acceptation des produits de traitement. Dans ce cas, elle s'appuie sur les documents (normes, certification, avis techniques, fiches techniques, études de laboratoire, etc.) fournis par l'entreprise et sur les mesures réalisées au cours de l'épreuve de convenance - d'autre part, dans la phase d'exécution de la tâche, pour vérifier la conformité des produits utilisés : <ul style="list-style-type: none"> a. pour les produits certifiés : le contrôle doit comporter au minimum un prélèvement conservatoire par produit et par chantier ; b. pour les autres produits, il convient également de procéder au minimum à un prélèvement par produit et par chantier et de vérifier sur ce prélèvement la conformité de l'ensemble des caractéristiques du produit avec les valeurs figurant dans la norme, l'avis technique ou, en l'absence de ces documents, dans la fiche technique du producteur. Puis, tout au long des travaux, il faut suivre l'homogénéité de la fourniture au moins en vérifiant l'origine et, si nécessaire, en suivant les fluctuations d'une (voire plusieurs) caractéristique(s) choisie(s) en fonction du délai de réponse de la mesure et de sa signification vis-à-vis du résultat recherché (cf. A-1.2.2.a.) 	<p>Lorsqu'il s'agit de produits mal connus, il y a lieu de tenir compte du fait que l'obtention des éléments permettant leur acceptation peut éventuellement exiger des délais relativement longs (de l'ordre de un à trois mois)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lorsque le contrôle du produit de traitement est assuré par le contrôle intérieur, le PAQ doit décrire la méthodologie suivie et, le cas échéant, indiquer la nature de la (ou des) caractéristique(s) retenue(s) et la fréquence des essais à réaliser (un ordre de grandeur indicatif de la fréquence de ces essais est d'un essai par 500 à 1 000 t de produit livré) - Dans le cas des ciments, la procédure de certification peut être considérée comme apportant un niveau de garantie suffisant sur la qualité des produits (pas d'essai spécifique à réaliser) - Dans le cas de la chaux vive, la caractéristique à retenir est généralement la réactivité - Dans le cas des LSR, la caractéristique à retenir est à définir pour chaque produit (teneur(s) en un ou plusieurs constituant(s), résistances mécaniques sur mortier normalisé, etc.)
<p>Vérification de la valeur moyenne et de la dispersion des caractéristiques de nature et d'état hydrique des matériaux à traiter</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cette action fait partie des études d'exécution qui sont à réaliser dans la phase de préparation des travaux. Elle est déterminante pour mettre au point la méthode d'exploitation du (ou des) gisement(s) réservé(s) pour le traitement. En général, elle doit être renouvelée pour chaque gisement - Elle fait appel aux méthodes générales de la reconnaissance géotechnique des terrains (prélèvement d'échantillons - identification suivant NF P 11-300 - extrapolation des résultats par application du raisonnement géologique) - Lorsqu'une opération d'homogénéisation du gisement est envisagée (par dépôt-reprise, en particulier), l'action doit être reconduite sur le dépôt provisoire (ou sur le lieu de traitement) pour constater les résultats obtenus 	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir les grandes lignes de son contenu : nature des caractéristiques mesurées, modes et nombre des sondages prévus, fréquence des essais d'identification à réaliser (un ordre de grandeur indicatif de la fréquence des essais est de cinq à dix identifications par jour où cette action est engagée)
<p>Vérification de la portance de l'arase des terrassements (avant mise en œuvre de la couche de forme)</p>	<p>Il est recommandé de conduire cette action en deux temps :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une première fois, avant la mise en œuvre de la dernière couche élémentaire constituant la PST (dans le cas d'un remblai) ou sur le fond de déblai, afin de vérifier globalement la compatibilité de la portance de l'arase avec la possibilité de réaliser une couche de forme en sol traité ($E_{v2} \geq 35$ MPa, cf. GTR) et, au besoin, de procéder à une amélioration de l'ensemble de la section concernée (par traitement à la chaux en particulier). Cette auscultation peut alors être relativement grossière - une seconde fois, juste avant la mise en œuvre de la couche de forme (24 h maxi). Cette seconde auscultation a pour but de délimiter d'éventuelles zones à purger. Pour cette auscultation, un pas minimal d'auscultation de un essai pour 500 à 1 000 m² est à recommander 	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir la méthodologie à suivre, le matériel de mesure et la fréquence des mesures - Pour cette action, l'observation du comportement de la plate-forme sous le passage d'un engin lourd est en général suffisante (après étalonnage sur quelques essais de portance) - Pour cette action, l'appareillage généralement adopté est la dynaplaque

TABLEAU C3-IV (suite)

Nature de l'action de contrôle	Consistance de l'action et stade d'avancement des travaux où elle doit être réalisée	Commentaires
Vérification des quantités de produit de traitement épandues	<p>Cette action est spécifique au traitement en place</p> <p>Elle comporte :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la détermination du coefficient de variation et la vérification de l'exactitude du (ou des) épandeur(s). Cette opération est généralement réalisée seulement lors de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens (sauf en cas de changement d'engin, voire de conducteur, où elle doit être renouvelée). Elle est conduite selon la méthode décrite en annexe 6 (ou par toute autre méthode estimée donner une précision équivalente) - la vérification, en cours d'exécution des travaux, des masses de produit épandues. Cette opération est réalisée systématiquement après toute intervention sur le réglage de l'épandeur et par sondages, durant l'exécution de la tâche. Elle est conduite selon la méthode décrite en annexe 6 (ou par toute autre méthode estimée donner une précision équivalente) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cette action étant réalisée en vue de l'acceptation des méthodes et des moyens, il est recommandé de réserver sa conception, son organisation et son interprétation au contrôle extérieur (cf. § C3-2.5.) Dans les cas où cela n'est pas possible, le PAQ doit définir précisément la méthodologie que le contrôle intérieur appliquera pour réaliser cette opération - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir la méthodologie utilisée et la fréquence des mesures à réaliser - La précision et la commodité de réalisation de ces deux opérations sont considérablement améliorées, lorsque l'épandeur dispose d'un système de pesée embarqué avec enregistrement. De plus, un tel dispositif apporte, par la continuité de l'information donnée, une assurance de qualité importante pour le travail réalisé entre deux interventions de contrôle
Vérification de la mouture obtenue après malaxage	<p>Cette action est à envisager aussi bien dans le traitement en place qu'en centrale</p> <p>Elle est réalisée à la fois lors de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens et elle est poursuivie en continu par le contrôle intérieur durant la phase d'exécution de la tâche et par sondages inopinés réalisés par le contrôle extérieur</p>	<p>Cette action ne requiert pas, en général, de mesures (le constat visuel suffit en général), toutefois dans certains cas (sols d'indice de plasticité élevé), il peut être justifié de procéder à un tamisage pour apprécier la fraction du matériau se présentant sous la forme de mottes dont la dimension excède la valeur spécifiée (20 mm au maximum)</p>
Vérification de l'état hydrique du matériau avant compactage	<p>Cette action comporte :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une évaluation de la précision de l'arroseuse (mesure de son coefficient de variation et de son exactitude) qui est réalisée généralement au stade de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens <p>La méthodologie appliquée peut s'inspirer de celle décrite dans l'annexe 6 pour déterminer la précision et l'exactitude de l'épandage des produits de traitement</p> <ul style="list-style-type: none"> - des vérifications de l'état hydrique du sol en cours de travaux par des mesures de teneurs en eau à partir de méthodes à délai de réponse rapide (four à micro-ondes, panneaux rayonnants, cf. normes NF P 94-49.1 et NF P 94-49.2) ou autres méthodes plus appropriées au chantier (pycnomètres à air, « speedy », etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cette action étant réalisée en vue de l'acceptation des méthodes et des moyens, il est recommandé de réserver sa conception, son organisation et son interprétation au contrôle extérieur (cf. § C3-2.5.) Dans les cas où cela n'est pas possible, le PAQ doit définir précisément la méthodologie que le contrôle intérieur appliquera pour réaliser cette opération - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir la méthodologie, le matériel de mesure et la fréquence des mesures (un ordre de grandeur de la fréquence de ces mesures est de cinq à dix par jour de mise en œuvre)
Vérification du fonctionnement de la centrale	<p>La qualité du fonctionnement de la centrale est évaluée conformément à la méthodologie définie dans les normes NF P 98-744-1 à 98-744-5</p>	
Vérification de la qualité du compactage	<p>Cette opération est réalisée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une part, lors de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens 	<ul style="list-style-type: none"> - Cette action étant réalisée en vue de l'acceptation des méthodes et des moyens, il est recommandé de réserver sa conception, son organisation et son interprétation au contrôle extérieur (cf. § C3-2.5.). Dans les cas où cela n'est pas possible, le PAQ doit définir précisément la méthodologie que le contrôle intérieur appliquera pour réaliser cette opération

TABLEAU C3-IV (suite)

Nature de l'action de contrôle	Consistance de l'action et stade d'avancement des travaux où elle doit être réalisée	Commentaires
	<ul style="list-style-type: none"> - d'autre part, durant la phase d'exécution de la tâche par des sondages conduits selon une méthodologie cohérente avec la formulation des exigences de compacité, à savoir : . lorsque les valeurs à atteindre sont exprimées en taux de compactage : utilisation de gammadensimètres permettant de déterminer la compacité moyenne et éventuellement fond de couche (dans le cas de cadre-type de marché 3 et 4, en particulier) . lorsque les modalités d'utilisation des compacteurs sont imposées : équipement de contrôlographes étalonnés, vérification des paramètres de classement et de fonctionnement, suivi des modalités de travail (plan de balayage, vitesse), épaisseur des couches élémentaires, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir le matériel de mesure et la fréquence des mesures (un ordre de grandeur indicatif de la fréquence de ces essais est de cinq à dix mesures par jour de mise en œuvre) - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir le matériel de mesure et le mode et l'organisation du dépouillement des enregistrements fournis par les contrôlographes
<p>Vérification des exigences de nivellement et d'épaisseur de la couche de forme</p>	<p>Cette action doit être engagée successivement aux trois stades suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - stade de l'arase terrassement terminée - préréglage - réglage final <p>Elle utilise les moyens et les méthodes topographiques classiques pour ce type de vérification (éventuellement renforcés pour tenir compte des tolérances plus exigeantes pouvant être imposées sur les sols fins traités)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir la méthodologie et le matériel de mesure à utiliser
<p>Vérification de l'exécution de la protection superficielle</p>	<p>Cette action est réalisée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lors de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens <p>- durant la phase d'exécution de la tâche par des mesures concernant les points faisant l'objet de stipulations et réalisées de manière inopinée par le contrôle extérieur.</p> <p>Ces points sont, en particulier :</p> <ul style="list-style-type: none"> . la qualité des produits utilisés (enduits de cure, émulsions de bitume, granulats, etc.) . les quantités de produits appliquées (granulats, émulsion, etc.) épandues <p>Pour ce qui concerne les protections impliquant des produits bitumineux, les contrôles sont à concevoir par référence aux normes relatives aux enduits superficiels (normes NF P 98-275-1 et NF P 98-276-1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cette action étant réalisée en vue de l'acceptation des méthodes et des moyens, il est recommandé de réserver sa conception, son organisation et son interprétation au contrôle extérieur (cf. § C3-2.5.) <p>Dans les cas où cela n'est pas possible, le PAQ doit définir précisément la méthodologie que le contrôle intérieur appliquera pour réaliser cette opération</p>
<p>Vérification des performances mécaniques de la plate-forme</p>	<p>Cette action est réalisée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lors de l'évaluation de la convenance des méthodes et des moyens. Pour ce faire, une ou plusieurs sections témoins peuvent être réalisées afin de répondre aux objectifs suivants : . fixer l'âge à partir duquel la couche peut être ouverte à la circulation de chantier . suivre l'évolution dans les temps des performances mécaniques de la couche traitée . vérifier l'obtention de la classe mécanique de la plate-forme recherchée (mesurée au plus tôt 28 j après la mise en œuvre) <p>- lors de la fin de l'exécution d'un tronçon de couche de forme ou immédiatement avant la mise en œuvre de la couche de fondation</p>	<p>Pour chacun des deux objectifs visés, cette action ne peut, en principe, être engagée qu'après un délai minimal de 28 j après mise en œuvre pour respecter les temps de prise du sol traité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cette action étant réalisée en vue de l'acceptation des méthodes et des moyens, il est recommandé de réserver sa conception, son organisation et son interprétation au contrôle extérieur (cf. § C3-2.5.) <p>Dans les cas où cela n'est pas possible, le PAQ doit définir précisément la méthodologie que le contrôle intérieur appliquera pour réaliser cette opération</p>

TABLEAU C3-IV (suite et fin)

Nature de l'action de contrôle	Consistance de l'action et stade d'avancement des travaux où elle doit être réalisée	Commentaires
Vérification du respect de l'environnement (vis-à-vis des poussières de produit de traitement)	<p>Des mesures peuvent s'avérer nécessaires sur certains chantiers sensibles (cf. annexe 5)</p> <p>Elles concernent principalement des mesures de vitesses du vent (pour décider de l'arrêt du traitement), et éventuellement de dépôt de poussières sur capteurs</p>	<p>- Lorsque cette vérification est assurée par le contrôle intérieur, le PAQ doit définir le matériel de mesure et la fréquence des mesures</p> <p>Par ailleurs, si la vérification des performances à court terme est réalisée après plusieurs jours de conditions météorologiques évaporantes, il est recommandé de procéder, 12 à 24 h avant la mesure, à un arrosage de la plate-forme (10 l d'eau par mètre carré environ)</p> <p>Étant donné les enjeux liés à l'obtention des performances visées, il est recommandé de réserver leur vérification au contrôle extérieur</p> <p>- Lorsque cela n'est pas possible, le PAQ doit définir le matériel de mesure, le type et la fréquence des mesures à réaliser</p>



Le test de réactivité à l'eau des chaux vives est un essai simple et rapide (moins de 30 min) qui rend compte globalement de la qualité d'une chaux. Il n'existe malheureusement pas d'essai équivalent ni pour les ciments ni surtout pour les LSR.

**Les appareils de mesure de la déformabilité
des plates-formes en sol traité**



*L'essai à la plaque.
Domaine de mesure : jusqu'à 250 MPa.
Cadence de mesure : deux à quatre essais par heure.*



*La dynaplaque II.
Domaine de mesure : jusqu'à 250 MPa.
Cadence de mesure :
vingt à trente essais par heure.*



*Le déflectographe Lacroix chassis long.
Domaine de mesure - Déflexion minimale
mesurable : 0,1 millimètre.
Cadence de mesure :
deux kilomètres par heure à raison
de deux mesures tous les cinq mètres.*

Le tableau C3-IV met en évidence le nombre et la diversité des actions de contrôle pouvant s'imposer sur un chantier de couche de forme en sol traité. Cependant, pour un chantier donné, d'une part toutes ne s'imposent pas, ou du moins n'ont pas la même importance relative, d'autre part leur répartition entre contrôle intérieur et contrôle extérieur peut différer sensiblement. Pour cette raison, l'établissement du Plan de contrôle exige, pour chaque projet, une réflexion spécifique prenant en compte :

- la pertinence de chacune des actions évoquées dans le tableau C3-IV eu égard aux particularités du chantier considéré,
- l'importance des enjeux liés aux différentes non-conformités pouvant se présenter,
- la fiabilité du contrôle intérieur telle que peut l'évaluer le maître d'œuvre,
- les moyens de contrôle extérieur jugés indispensables vis-à-vis des enjeux concernés.

■ 2.4. Points d'arrêt

Les principaux points d'arrêt à considérer et les actions nécessaires à leur levée sont indiqués dans le tableau C3-V.

TABLEAU C3-V

Points d'arrêt spécifiques à la réalisation d'une couche de forme en sol traité et actions à mener pour leur levée

Nature du point d'arrêt	Actions à exécuter pour lever le point d'arrêt *	Commentaires
Acceptation des produits de traitement (fournisseurs et nature des produits)	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation du Plan d'assurance de la qualité du fournisseur - Dans le cas d'un produit de traitement proposé par l'entreprise différent de celui prévu dans le DCE, procéder à l'évaluation des justifications présentées par l'entreprise (références de chantiers comparables pour des petits projets, expertise de l'étude de laboratoire fournie par l'entreprise pour les autres projets) 	Il est recommandé que le contrôle extérieur réalise quelques essais de recalage de l'étude « entreprise » par rapport à l'étude « projet »
Acceptation des ateliers (épandeurs, malaxeurs, centrales de fabrication, arroseuses, compacteurs, engins de réglage, gravillonneurs, répanduses à émulsion)	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation des performances : <ul style="list-style-type: none"> . des épandeurs . des centrales de fabrication . des malaxeurs . des arroseuses . des matériels de réglage . des engins de compactage . des gravillonneurs et des répanduses à émulsion 	<p>Ces actions peuvent être regroupées et organisées dans le cadre d'une épreuve de convenance (cf. § C3-2.5.)</p> <p>En plus de la vérification des exigences stipulées, l'évaluation appréciera la technologie des matériels, leur état d'entretien et de fonctionnement, leur comportement vis-à-vis de l'environnement, leur productivité en relation avec les délais de réalisation du chantier, etc.</p>
Acceptation des méthodes d'exécution (homogénéisation des matériaux du gisement, mode fabrication et de mise en œuvre du mélange pour garantir les tolérances de nivellement et l'épaisseur de la couche de forme, organisation de chantier adoptée en vue du respect du délai de maniabilité, mode d'exécution de la protection superficielle)	<ul style="list-style-type: none"> - Identifications en nombre suffisant permettant une évaluation objective de la technique de préparation et d'homogénéisation du gisement adoptée - Appréciation visuelle de la qualité du mélange. Toutefois, lorsque l'entreprise propose un traitement en place alors que le DCE avait prévu un traitement en centrale, l'évaluation de la qualité du mélange doit être réalisée de manière plus rigoureuse (établissement d'un plan d'expérience spécifique pour le constat des caractéristiques et de l'homogénéité du mélange, références de chantiers similaires, recherche d'expertise, etc.) - Vérification du respect du nivellement et de l'épaisseur de la couche de forme <p>Cette opération comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> . la vérification du réglage de l'arase des terrassements (cf. « Nivellement et portance de l'arase des terrassements » ci-après) . l'évaluation de la pertinence de la cote retenue pour le préréglage 	<p>Ces actions peuvent être regroupées et organisées dans le cadre d'une épreuve de convenance (cf. § C3-2.5.)</p> <p>On peut envisager, en particulier, la vérification de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la mouture (par mesure du refus au tamis de 20 mm) - l'homogénéité de la répartition du liant dans le sol (par une méthode chimique de dosage adaptée ou par prélèvement, moulage et écrasement d'éprouvettes suivant une méthodologie prédéfinie) <p>Les actions correspondantes consistent en des levés topographiques classiques</p> <p>La cote de préréglage doit être fixée en fonction des tolérances de nivellement, du tassement résiduel produit lors du compactage final et de l'évaluation de l'épaisseur « feuilletée » devant être rabotée</p>
Nivellement et portance de l'arase des terrassements	<ul style="list-style-type: none"> Levé topographique de l'arase des terrassements Auscultation de la portance de l'arase à partir de mesures de modules à la plaque ou la dynaplaque 	Ce point d'arrêt doit être levé au plus tard juste avant la mise en œuvre de la couche de forme
Nivellement et performances mécaniques de la couche de forme	<ul style="list-style-type: none"> Levé topographique de la plate-forme Mesures de la déflexion de la couche traitée et/ou des caractéristiques mécaniques à long terme (E_p, R_p) du sol traité réalisées sur des prélèvements carottés 	<p>Le point d'arrêt concernant le nivellement doit être levé immédiatement après la réalisation d'un tronçon identifié de couche de forme</p> <p>Le point d'arrêt concernant la déformabilité se pose au plus tôt 28 j (cas du traitement avec des ciments) après la réalisation d'un tronçon de couche de forme</p>

* En règle générale, les actions de contrôle relatives à la levée des points d'arrêt relèvent du contrôle extérieur

■ 2.5. Convenance

L'objet de cette opération est de démontrer, par la réalisation d'une (ou plusieurs) séquence(s) représentative(s) de l'ensemble des phases de construction de l'ouvrage appelée(s) « épreuve(s) de convenance », que les méthodes, les matériels, les matériaux, proposés par le soumissionnaire permettent de satisfaire les exigences du marché. Dans tous les cas, la conception et l'interprétation de cette opération reviennent au maître d'œuvre. Son organisation est établie en concertation avec l'entreprise selon des modalités fixées par le maître d'œuvre (choix du site et du programme, définition des objectifs et des paramètres mesurés, choix des moyens et des méthodes de mesure).

Pour la réalisation des couches de forme en sols traités, l'épreuve de convenance peut faire l'objet d'une action unique, si l'on peut admettre qu'elle se déroulera selon des modalités représentatives de l'ensemble du chantier (situation réaliste pour des chantiers petits ou relativement simples). Dans les autres cas, la convenance pourra être prononcée au terme d'actions partielles exécutées au fur et à mesure de la mise au point des différentes méthodes d'exécution : préparation-homogénéisation des sols, fabrication du mélange, mise en œuvre, compactage, réglage, réalisation de la protection superficielle, etc.

Le tableau C3-IV a déjà distingué, parmi les actions de contrôle à réaliser, celles qui sont à engager pour prononcer la convenance des méthodes et des moyens.

La convenance est prononcée par le maître d'œuvre lorsque les résultats de l'épreuve sont jugés conformes au marché. Sinon la séquence représentative

de la construction de l'ouvrage est prolongée jusqu'à trouver des conditions de fonctionnement et de production acceptables permettant de lever le point d'arrêt.

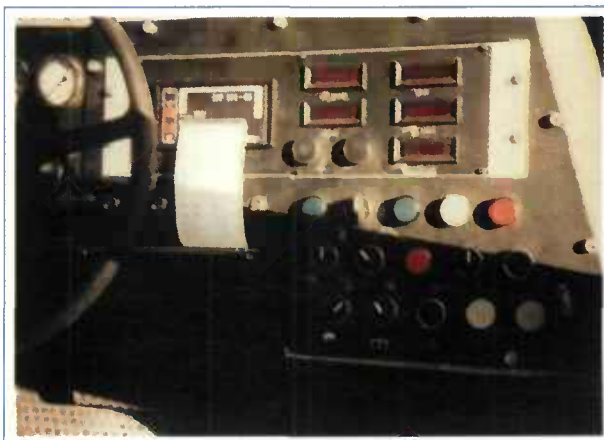


Le comportement des matériels et des techniques d'exécution fait partie des actions d'assurance de la qualité



... ainsi que la vérification de leur état de fonctionnement. Ici le délabrement des jupes anti-poussières laisse mal augurer des autres aspects et notamment de la précision du doseur !

L'utilisation d'épandeurs à doseurs comportant un doseur à assistance pondérale et un enregistrement des valeurs épandues constitue une garantie importante de la qualité de cette prestation en même temps qu'elle minimise les actions de contrôle des quantités réellement épandues.



Si, au cours de l'exécution de l'ouvrage, des conditions de chantier sensiblement différentes de celles prises en compte pour démontrer la convenance de l'une ou l'autre de ces actions partielles se présentent, le maître d'œuvre doit apprécier s'il convient de renouveler l'action permettant de prononcer la convenance pour ces nouvelles conditions.

2.6. Anomalies

Une anomalie est constituée par une divergence entre ce qui est constaté et ce qui était attendu.

Dans la réalisation d'une couche de forme en sol traité, toute anomalie constatée après expiration du délai de maniabilité (ou dont la correction ne peut être réalisée dans le délai de maniabilité) conduit nécessairement à un point d'arrêt dont la levée exige :

- ▶ l'analyse de l'anomalie constatée (description précise, cause(s) probable(s), nature et importance des risques induits sur la qualité d'usage de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage concerné, etc.),
- ▶ les modalités de correction devant être apportées (modification des méthodes et des moyens, reprise du traitement avec surdosage de liant, augmentation de l'épaisseur de la couche de forme, modification du dimensionnement de la structure de chaussée, destruction et réfection selon les exigences initiales, mise en place d'un suivi particulier de la zone concernée, etc.),
- ▶ l'établissement d'une fiche d'anomalie formalisant l'ensemble des éléments ci-dessus.



La qualité d'une couche de sol traité dépend beaucoup des difficultés d'organisation du chantier considéré. Sur ce chantier très exigu de construction d'un parking, il sera a priori difficile d'obtenir le même niveau de qualité que celui pouvant être espéré pour une couche de forme autoroutière.



État d'une couche de forme autoroutière de qualité en limon traité à la chaux et au ciment à la fin de sa durée de service (en tant que piste d'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation).



Une anomalie telle que celle-ci (absence localisée de prise) sera toujours lourde de conséquences (financière, technique, programmation) et exigera une expertise complexe pour en déterminer les causes et les remèdes.

Remarque. L'expérience montre que l'anomalie la plus fréquemment constatée est une déformabilité de la plate-forme supérieure à la valeur attendue. Il s'agit là d'une anomalie à caractère global dont le traitement nécessite l'analyse des causes l'ayant provoquée ainsi que les dispositions permettant de la corriger. Celles-ci sont généralement complexes à définir et coûteuses à exécuter (destruction et reconstruction de la couche traitée, révision du dimensionnement de la structure ou de caractéristiques mécaniques des matériaux, etc.). Leur définition exige le plus souvent des actions d'expertise. Pour éviter de se trouver dans cette situation, il faut, le plus en amont possible, détecter les anomalies « élémentaires » qui peuvent être la cause de cette anomalie globale (sous-dosage, état hydrique inadapté, sous-dimensionnement, etc.) et y apporter les corrections qui, à ce stade, sont le plus souvent évidentes et financièrement limitées.

■ 2.7. Synthèse des actions d'assurance de la qualité

Après achèvement des travaux, la démarche de l'assurance de la qualité prévoit l'établissement d'une synthèse des actions d'assurance de la qualité réalisées durant l'exécution de l'ouvrage. Celle-ci fait partie des pièces du dossier de récolement de l'ouvrage.

Cette synthèse doit notamment comporter (par ordre d'intérêt) :

- les anomalies ayant donné lieu à l'établissement de fiches, leur(s) cause(s), leurs modalités de traitement, etc.,
- la liste des ouvrages ou parties d'ouvrages (avec leur localisation sur les plans) où demeurent des doutes sur le niveau de qualité effectivement atteint et/ou pour lesquels une surveillance particulière est souhaitable pour suivre leur comportement après mise en service, et suivant l'intérêt porté par le maître d'œuvre :
- un synoptique des actions de contrôle réalisées (fréquence, méthodes et moyens utilisés, représentativité, pertinence, etc.),
- une compilation ordonnée des résultats des mesures, des conditions météorologiques et des constatations réalisées au fur et à mesure du déroulement du chantier,
- etc.



EXEMPLE D'APPLICATION AUX REMBLAIS

La figure 2 présente la manière d'utiliser l'abaque de la figure 1 :

- Un traitement à 2 % de chaux vive d'un prix de 500 F/t, dans un sol de densité sèche $1,80 \text{ t/m}^3$ et nécessitant des manipulations (épandage, malaxage, transport, régalage, compactage, etc.), d'un coût estimé à 15 F/m^3 , revient à 33 F/m^3 .
- Dans le cas d'un emprunt situé à 16 km, un coût de transport de $2 \text{ F/m}^3 \cdot \text{km}$, un coût d'exploitation de l'emprunt de 20 F/m^3 et un coût de mise en œuvre de 6 F/m^3 , la solution « emprunt » revient à 57 F/m^3 .
- En cheminant de manière inverse dans l'abaque, on peut constater (trajet pointillé) que le coût du recours à l'emprunt est plus faible que celui de la solution « traitement » tant que la distance sur laquelle il faut transporter les matériaux d'emprunt reste inférieure à 2 kilomètres.
- On peut également rechercher, jusqu'à quel dosage en chaux, le coût du traitement apparaît plus faible que celui du recours à un emprunt nécessitant un transport des matériaux sur une distance donnée.
- etc.

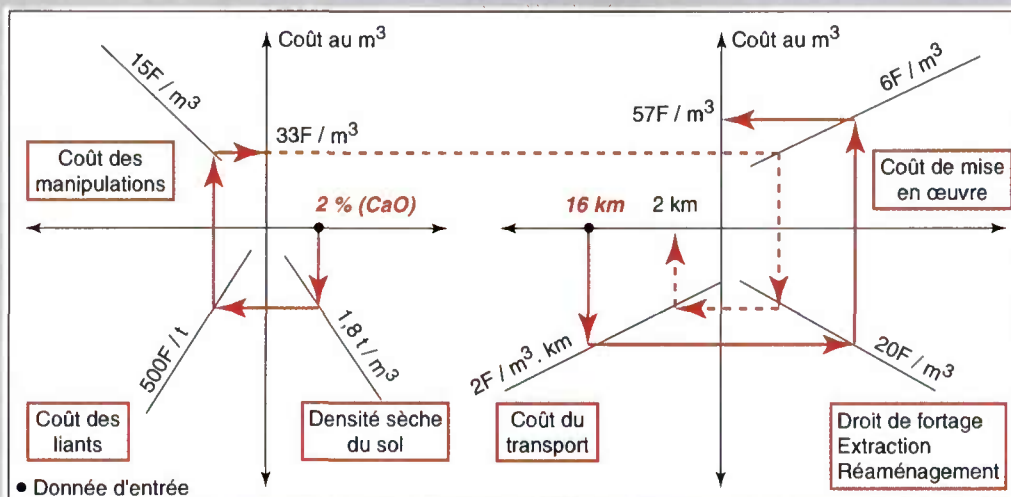


Figure 2. Utilisation des abaques pour une comparaison économique rapide entre traitement et recours aux emprunts dans le cas de la réalisation de remblais.

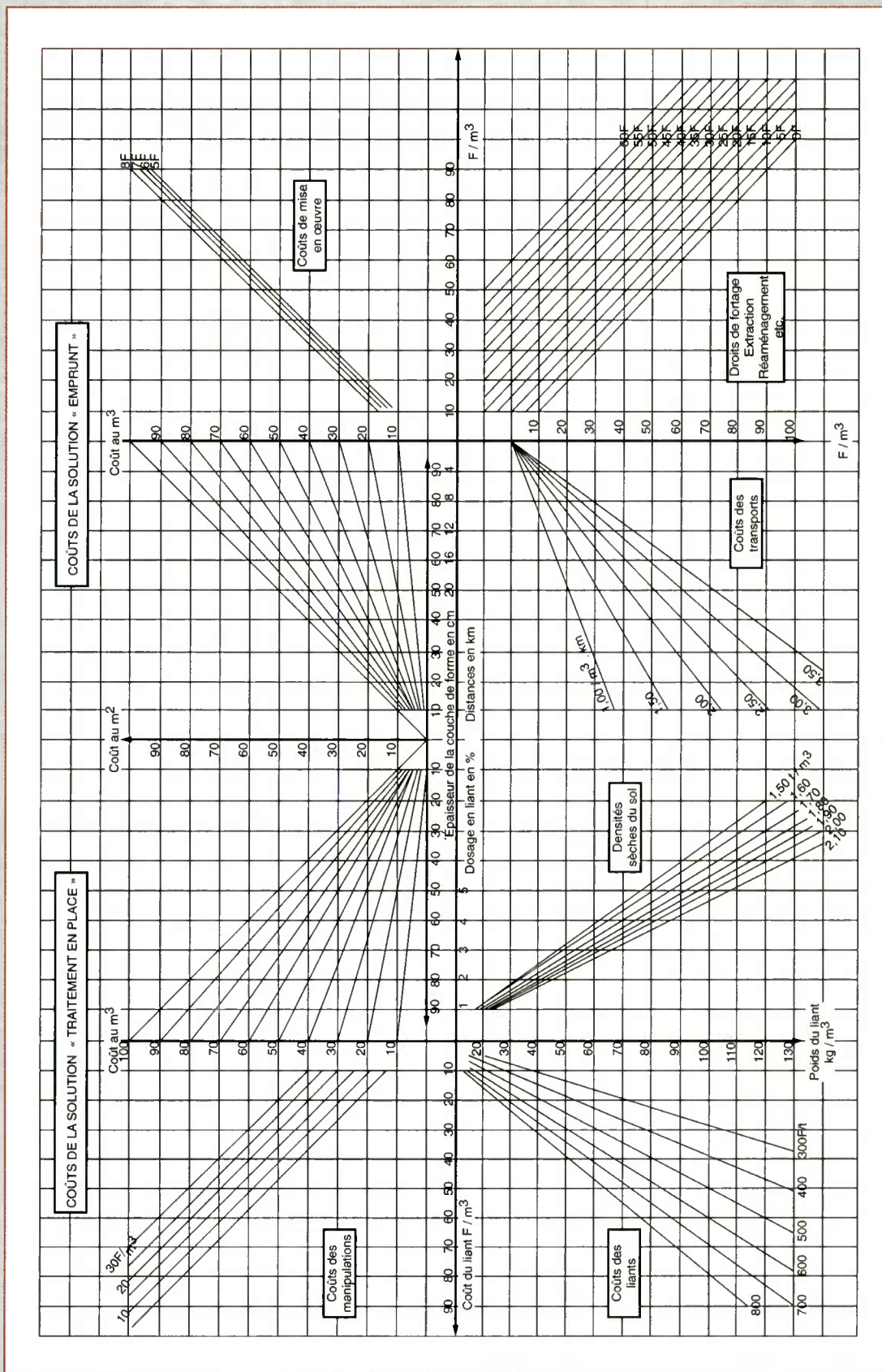


Figure 1. Abaques permettant une comparaison économique approximative rapide des coûts entre traitement du sol ou recours à des emprunts.

ANNEXE 1	Informations complémentaires relatives à la chaux aérienne	169
ANNEXE 2	Informations complémentaires relatives aux ciments	177
ANNEXE 3	Informations complémentaires relatives aux liants hydrauliques routiers	184
ANNEXE 4	Méthode rapide de comparaison économique entre la technique de substitution par recours aux emprunts et la technique du traitement de sol (pour remblai et couche de forme)	188
ANNEXE 5	Règles pratiques relatives à la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de chaux ou de liants hydrauliques	192
ANNEXE 6	Méthodes pratiques pour la vérification de la masse surfacique épandue (exactitude de l'épandage) et pour la détermination du coefficient de variation d'un épandeur	196
ANNEXE 7	Évaluation de la sensibilité des performances aux dispersions d'exécution et méthode d'ajustement du dosage en liant permettant de les compenser	200
ANNEXE 8	Éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement pour réemploi en remblai des sols sensibles à l'eau humides	203
ANNEXE 9	Éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement des sols pour la réalisation de couches de forme	214

Page laissée blanche intentionnellement

Informations complémentaires relatives à la chaux aérienne



Vue d'ensemble d'une unité de production de chaux aérienne calcique (Sorcy 55).

Les informations présentées dans cette annexe sont, pour l'essentiel, reprises de la norme NF P 98-101 et de la plaquette « La chaux : un produit, une industrie » (*Économie - Géographie*, 318, août 1994, 4 rue Quentin Bauchart 75008 Paris), éditée sous l'égide de la Chambre syndicale nationale des fabricants de chaux grasses et magnésiennes, CSNFCGM).

Origine

Il est fort probable que la chaux ait été découverte dès l'époque préhistorique, suite à l'utilisation de pierres calcaires dans la construction des foyers destinés à la conservation du feu.

Des traces d'utilisation de la chaux dans la construction ont été recensées dans les plus anciennes civilisations : assyrienne, égyptienne, grecque. Mais c'est évidemment la civilisation romaine qui a révélé ce matériau et chacun connaît les impressionnantes réalisations qu'il a permis.

Différentes natures de chaux

Suivant la nature et la pureté du calcaire d'origine, différents types de chaux peuvent être produits comme le montre le tableau I.

Les carbonates de base utilisés pour la fabrication de la chaux sont issus des roches sédimentaires dont l'origine peut être :

- organique, résultant de la constitution de récifs et dalles marines à partir d'algues et de coquilles d'animaux marins. On les trouve dans le Var, Bourgogne, Bassin parisien, Meuse, Touraine, etc. ;
- biodétritique, résultant de la sédimentation de micro-organismes mêlés à divers minéraux. L'exemple le plus représentatif en est la craie que l'on trouve affleurante sur le pourtour du Bassin parisien ;
- biochimique, résultant de la précipitation directe du carbonate de calcium. On les trouve en Brie et en Beauce.

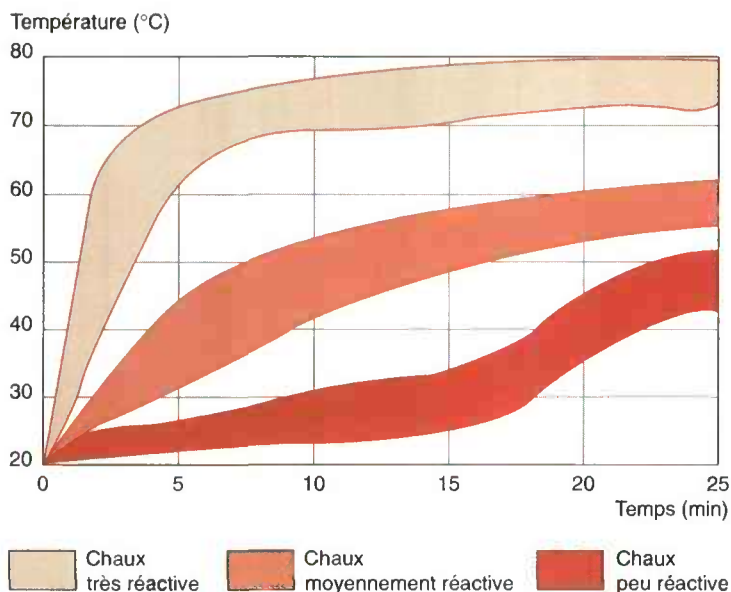
TABLEAU I
 Différentes natures de chaux

Mode d'obtention de la chaux	Composition du carbonate de base		
	Carbonate de calcium quasiment pur	Carbonate de calcium + 15 à 20 % d'argile	Mélange de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium
Calcination du carbonate de base	Chaux calcique aérienne vive	Chaux hydraulique	Chaux dolomitique aérienne vive
Calcination du carbonate de base puis hydratation	Chaux calcique aérienne éteinte	Chaux hydraulique éteinte	Chaux dolomitique éteinte

Propriétés physico-chimiques des chaux calciques

Les principales propriétés physiques et chimiques de la chaux vive sont les suivantes :

- masse volumique absolue (porosité nulle) : 3,34 g/cm³ ;
- masse volumique apparente en vrac : 0,8 à 1 g/cm³ ;
- structure cristalline : cubique ;
- point de fusion : 2 570 °C ;
- solubilité : 0,14 g à 0 °C et 0,054 g à 100 °C (pour 100 g de solution saturée) ;
- basicité :
 - 75 g de chaux vive neutralisent 100 g d'acide chlorhydrique,
 - une solution aqueuse à 20 °C de chaux vive a un pH de l'ordre de 11,5 à une concentration de 0,12 g/l et un pH de 12,5 à une concentration de 1,03 g/l ;



➤ réactivité à l'eau : elle est mesurée par l'essai dit « de réactivité à l'eau » (*cf.* norme NF P 98-102). Cet essai mesure l'élévation, en fonction du temps, de la température produite par la chaleur dégagée en hydratant 150 g de chaux vive dans 600 g d'eau à 20 °C. La vitesse de montée de la température ainsi que la valeur finale atteinte peuvent varier très largement suivant la finesse de mouture et la nature de la chaux vive (calcique ou dolomitique) comme le montre le graphique de la figure 1.

Figure 1.
 Réactivité des différentes chaux vives.

Caractéristiques des chaux aériennes calciques utilisées pour le traitement des sols

Elles sont indiquées dans la norme NF P 98-101.

☐ Chaux vives

- Les **caractéristiques** considérées sont :
 - la teneur en CaO libre global, mesurée par la méthode « Leduc » selon la norme NF P 15-461,
 - la teneur en MgO, mesurée par l'une des méthodes décrites dans les normes NF U 44-145, 44-146, 44-147 ou 44-148,
 - la réactivité à l'eau, mesurée par l'essai de réactivité défini par la norme NF P 98-102,
 - les passants à 0,08, à 0,2 et à 2 mm, mesurés selon la norme P 18-560.
- Les **spécifications** relatives aux chaux vives utilisables pour le traitement des sols, retenues dans la norme NF P 98-101, sont par ailleurs les suivantes :
 - teneur en CaO libre global : $\geq 80 \%$,
 - teneur en MgO : $\leq 8 \%$,
 - passant à 0,08 mm : $\geq 50 \%$,
 - passant à 0,2 mm : $\geq 80 \%$,
 - passant à 2 mm : 100 %.

☐ Chaux éteintes

- les **caractéristiques** considérées sont :
 - les teneurs en oxyde de calcium (CaO) libre et en oxyde de magnésium (MgO) mesurées selon les normes indiquées précédemment,
 - le passant à 0,08 mm mesuré selon la norme indiquée précédemment,
 - la teneur en eau libre mesurée selon la norme NF P 94-050.
- Les **spécifications** relatives aux chaux éteintes utilisables pour le traitement des sols, retenues dans la norme NF P 98-101, sont par ailleurs les suivantes :
 - teneur en CaO libre global : $\geq 50 \%$,
 - teneur en MgO : $\leq 6 \%$,
 - passant à 0,08 mm : $\geq 90 \%$,
 - teneur en eau libre : $\leq 2 \%$.

Fabrication

👉 Chaux vive

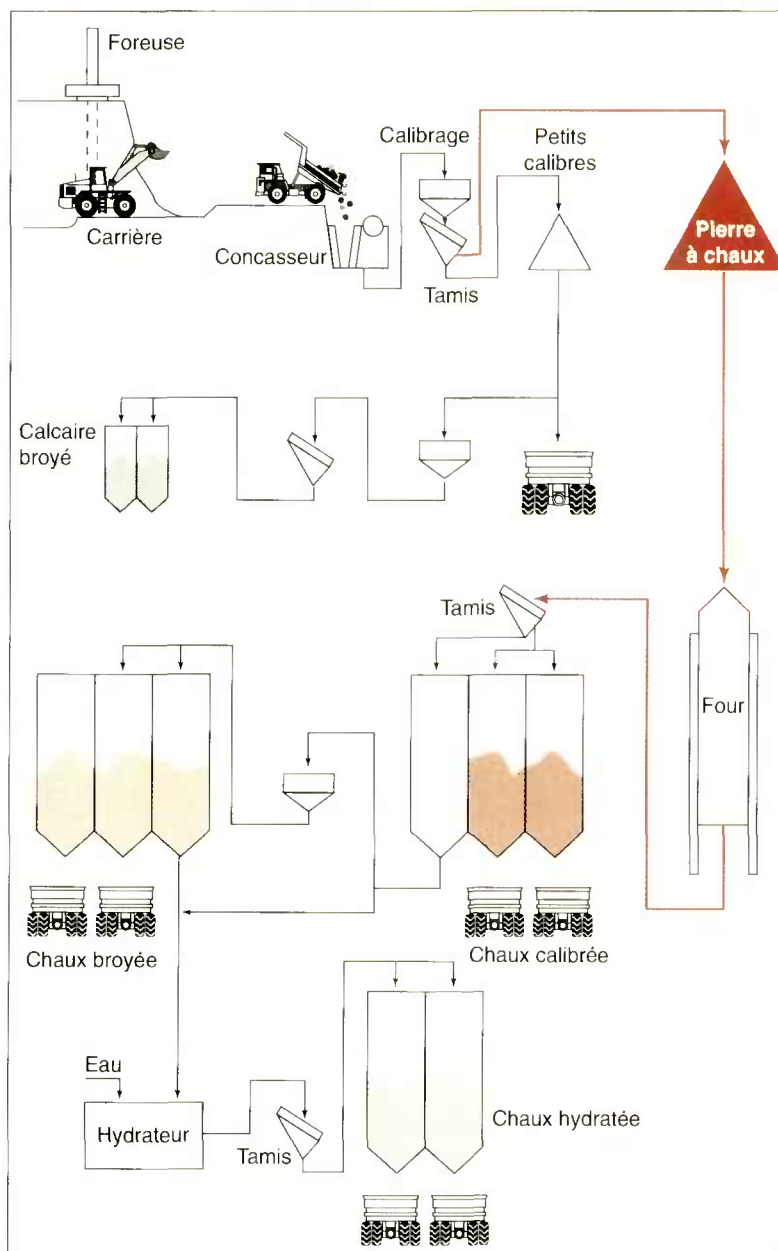
Le calcaire constituant le carbonate de base est généralement extrait à l'explosif. Il est ensuite concassé puis criblé pour éliminer la fraction fine (0/10 mm dans le cas des fours verticaux et 0/5 mm dans le cas des fours rotatifs) (fig. 2). En moyenne, on considère qu'il faut extraire 2,5 t de calcaire pour produire 1 t de chaux vive.

Les fours de calcination sont soit verticaux, soit rotatifs.

☐ Fours verticaux

Les fours verticaux (ou droits) peuvent être simples (fig. 3), ce sont les plus anciens et encore les plus nombreux, ou à cycles alternés (fig. 4), plus récents. Ces derniers ont une plus grande productivité (jusqu'à 800 t/j) et un meilleur rendement énergétique.

Figure 2.
Fabrication
de la chaux.
Schéma général.



Dans les fours verticaux, le calcaire intimement mélangé au combustible (coke de charbon) est introduit à la partie supérieure et la cuisson du calcaire s'effectue progressivement du bas vers le haut. La chaux vive produite à la partie basse du four est refroidie par un courant d'air froid ascendant puis extraite en continu à la base du four. Le gaz constitué par l'air de refroidissement et le CO_2 dégagé, porté à haute température par son passage au travers de la zone de combustion, vient à son tour réchauffer le mélange coke-calcaire au fur et à mesure de son introduction dans la partie supérieure du four. Dans les fours verticaux simples, il est finalement dirigé vers les dépoussiéreurs puis libéré à l'extérieur par la cheminée. Dans les fours à cycles alternés, ce gaz encore chaud (environ $200\text{ }^\circ\text{C}$) est utilisé pour réchauffer le mélange calcaire-combustible avant l'amorçage de la combustion, ce qui conduit à un rendement de plus de 1 t de chaux vive par 1 000 th consommées.

La plupart des fours verticaux modernes comportent également des brûleurs latéraux, situés au niveau de la zone de combustion (fig. 3), alimentés par des combustibles liquides

Fours de calcination

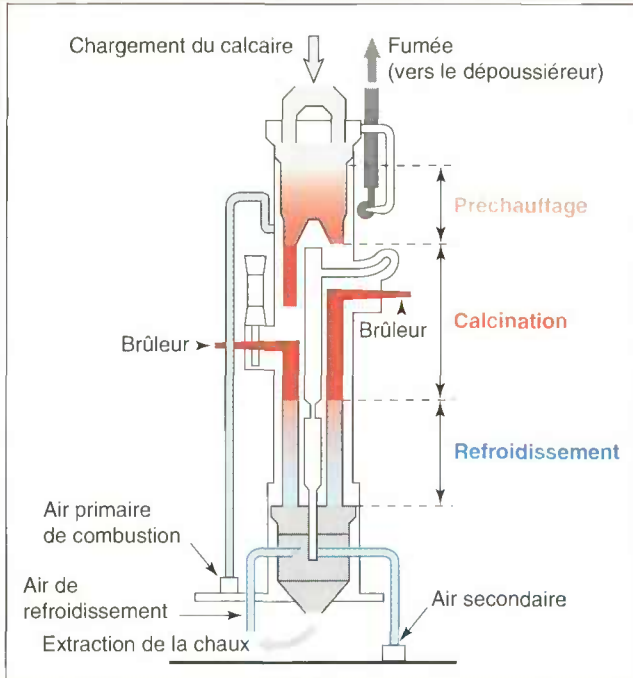


Figure 3. Four vertical simple.

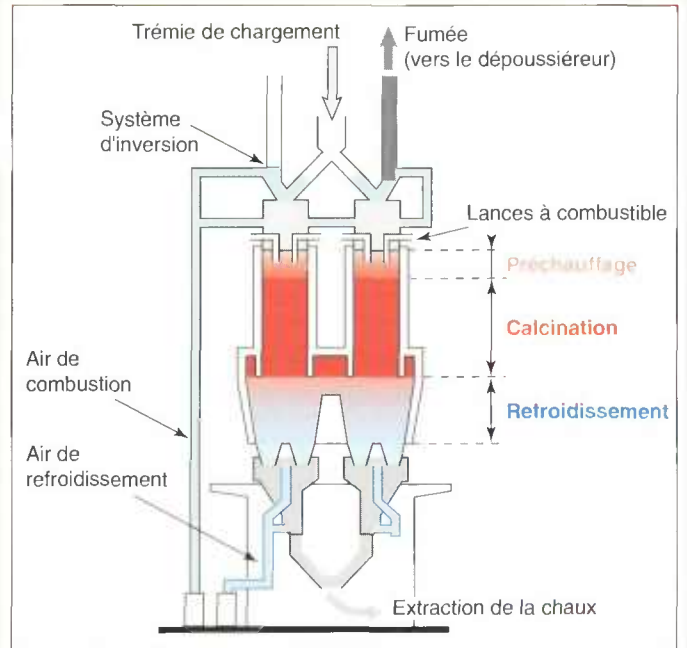


Figure 4. Four vertical à cycles alternés.

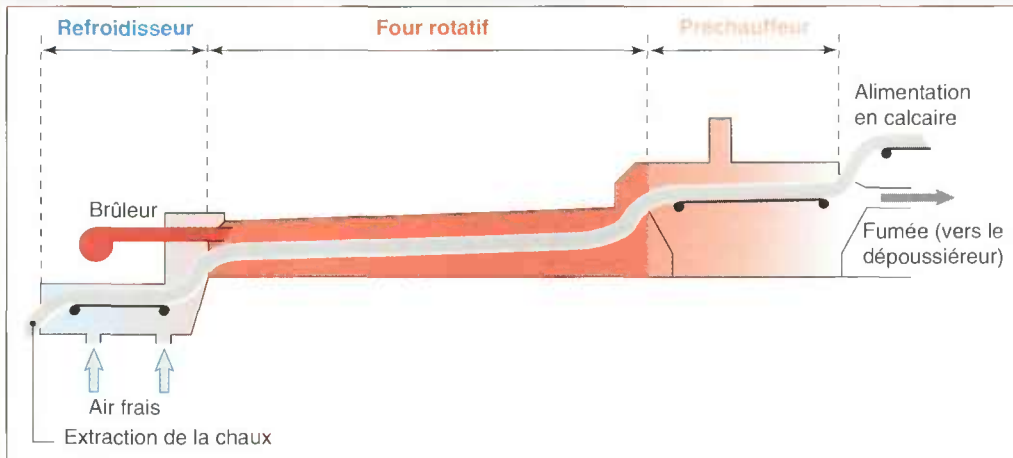


Figure 5. Four rotatif.

ou gazeux qui viennent compléter, voire se substituer à l'apport calorifique du coke (en 1994, pour la France, la consommation des combustibles utilisés dans ces fours s'est répartie en gros à raison de 22 % pour le coke, 6 % pour le fuel à basse teneur en soufre et 72 % pour le gaz).

Fours rotatifs

Les fours rotatifs sont inspirés de ceux utilisés pour la fabrication des ciments (fig. 5). On retrouve toutefois les mêmes sens de cheminement du calcaire et des gaz de réchauffement que dans les fours verticaux. Leur intérêt est leur plus grande productivité (pouvant atteindre 1 000 t/j), une plus grande souplesse d'utilisation et leur possibilité d'admettre une fraction granulaire plus fine ($d_{\text{mini}} = 5$ mm au lieu de 10 mm pour les fours verticaux). En revanche, leur rendement énergétique est légèrement inférieur à celui des fours verticaux à cycles alternés (1 200 th/t de chaux vive).

Chaux éteinte

La chaux éteinte est fabriquée par hydratation de la chaux vive dans un hydrateur. Dans cet équipement, la chaux et l'eau sont intimement mélangées, la quantité d'eau doit être exactement calculée de manière à être nécessaire et suffisante pour assurer l'hydratation complète de la chaux vive tout en fournissant un produit sec (en tenant compte, par ailleurs, de l'évaporation produite par l'exothermicité de la réaction d'hydratation).

À la sortie de l'hydrateur, la chaux éteinte se présente sous la forme d'une poudre très fine, pouvant néanmoins contenir certains éléments plus grossiers (incuits ou surcuits) n'ayant pas participé à l'hydratation. Ces éléments constituant le « grappier » sont éliminés par tamisage.

Utilisations

La chaux est un produit ayant des applications dans des domaines extrêmement divers comme le montre le tableau II établi pour la France.

TABLEAU II
Utilisations des chaux en 1998

Ventilation des emplois des chaux grasses et magnésiennes	Total 1998 (t)	% du total
Sidérurgie (France)	1 087 901	35,02
Sidérurgie (exportation)	301 422	9,70
Routes et stabilisation des sols	403 577	12,99
Agriculture	352 468	11,35
Traitement des eaux urbaines	86 675	2,79
Traitement des eaux industrielles	180 153	5,80
Bâtiment	57 840	1,86
Béton cellulaire	22 190	0,71
Chimie et pétrochimie	54 883	1,77
Traitement des fumées (déchloration)	62 422	2,01
Traitement des fumées (désulfuration)	24 748	0,80
Papeterie et cartonnerie	57 958	1,87
Verrerie	16 059	0,52
Minerais et métaux non ferreux	41 937	1,35
Exportation (hors sidérurgie)	296 440	9,54
Environnement (divers)	41 858	1,35
Divers (sucrieries, déchets, alimentation, etc.)	18 158	0,58
Total	3 106 687	100

On constate que l'application majeure (environ 40 %) reste encore la sidérurgie, malgré le remplacement progressif du minerai de fer lorrain par des minerais exempts de phosphore et l'utilisation croissante de convertisseurs électriques.

L'application en traitement des sols pour le génie civil a été croissante jusqu'en 1990. Depuis, elle fluctue, selon les programmes de travaux, aux alentours de 400 000 t/an soit une proportion de l'ordre de 15%, ce qui place cette application au deuxième rang des utilisations.

Production

L'industrie française de la chaux, en 1994, a atteint 1,3 milliard de francs de chiffre d'affaires pour une production de 3 105 000 t, elle emploie un effectif d'environ 1 100 personnes (non compris les personnes affectées au transport du produit, tâche qui est généralement sous-traitée à des sociétés de transport disposant du matériel approprié).

L'implantation des usines de chaux sur le territoire métropolitain ainsi que l'ordre de grandeur de leur capacité de production sont indiqués sur la figure 6.

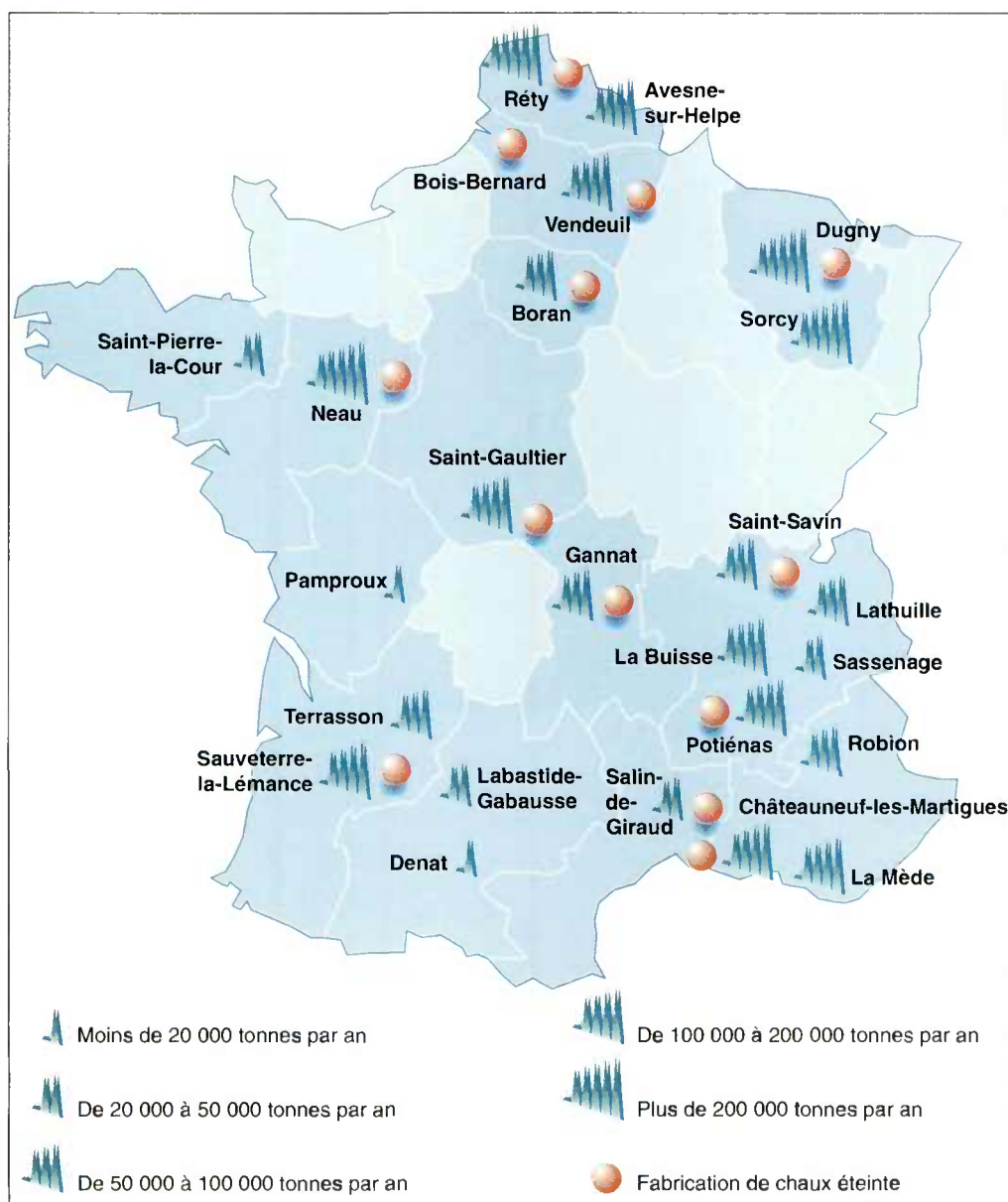


Figure 6. Implantation et capacités de production des usines de chaux en France (1994).

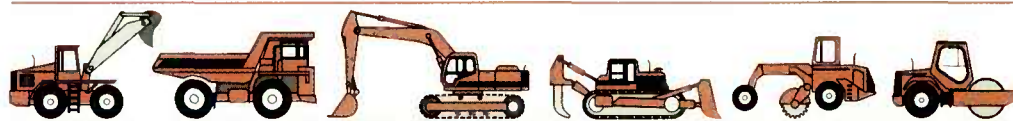
**ORGANISME PROFESSIONNEL
DE L'INDUSTRIE CHAUFOURNIÈRE**

**Chambre syndicale nationale des fabricants
de chaux grasses et magnésiennes (CSNFCGM)**

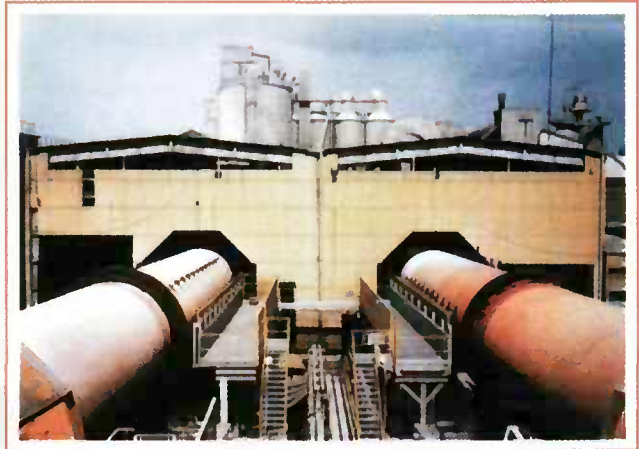
30, avenue de Messine 75008 PARIS

01 45 63 02 66

Télécopie 01 53 75 02 13



Informations complémentaires relatives aux ciments



Fours rotatifs de cimenterie.

Les informations présentées dans cette annexe sont, pour l'essentiel, reprises de la norme NF P 15-301 (révision 1994) et de la plaquette « L'industrie cimentière française » (*Économie - Géographie*, 323, mars 1995, 4 rue Quentin Bauchart 75008 Paris), éditée sous l'égide des organismes professionnels cimentiers : Association technique de l'industrie des liants hydrauliques (ATIHL), Centre d'information sur le ciment et ses applications (CIMBETON), Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC).

Origine

Bien que des liants hydrauliques, fabriqués à partir de chaux et de matériaux pouzzolaniques, aient été utilisés depuis l'Antiquité, notamment par les romains, la découverte du ciment, au sens strict du terme, ne date que du début du XIXe siècle.

C'est le français Louis-Joseph Vicat qui, en 1817, à partir de l'analyse des liants hydrauliques utilisés à l'époque, élabore la première théorie de l'hydraulicité qui va conduire à l'invention du ciment artificiel.

En effet, quelques années plus tard (1824), l'écossais Joseph Aspdin reprend la théorie de Louis-Joseph Vicat, en précisant la valeur de 1450 °C comme étant la température produisant la clinkerisation, pour fabriquer un ciment qu'il dénomme « Portland », du nom de la localité anglaise où est extrait le calcaire argileux utilisé (ce nom est encore en usage pour dénommer les ciments comportant une proportion majoritaire de clinker).

À partir de 1885, l'emploi du ciment artificiel « Portland » dans les grands bâtiments et ouvrages de travaux publics est reconnu, ouvrant ainsi la voie à une industrie lourde nouvelle.

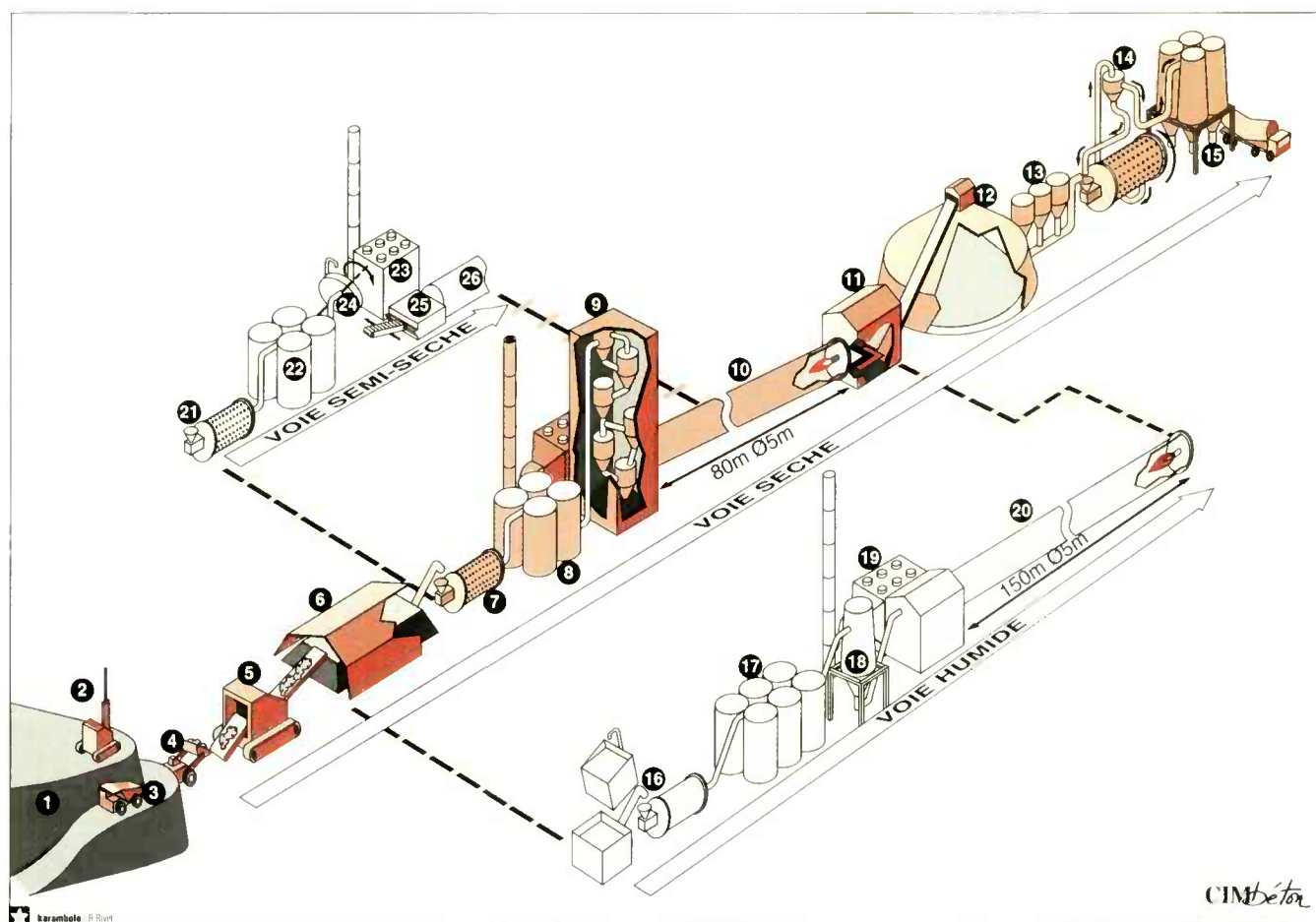
Fabrication

Elle passe tout d'abord par la fabrication du clinker puis se poursuit par l'adjonction de constituants divers introduits dans le clinker au moment de son broyage.

Le clinker est fabriqué à partir de calcaire (80 %) et d'argile (20 %), extraits dans des carrières généralement distinctes (en général, il faut 1,6 à 1,8 t de ces produits de carrière pour fabriquer 1 t de clinker). Suivant le type de ciment recherché, on ajoute de l'alumine (sous forme de bauxite) et/ou des oxydes de fer pour obtenir la composition requise.

Après concassage fin, ces constituants sont intimement mélangés pour constituer le « cru » qui, après cuisson à 1 450 °C, deviendra le clinker.

Les différents procédés de fabrication du clinker se distinguent principalement par le mode de préparation du « cru » (fig. 1).



★ karabole B Rivet

CIMÉTOR

VOIE SÈCHE

- 1 Carrières (calcaire, argile)
- 2 Sondeur
- 3 Dumper
- 4 Chargeur
- 5 Concasseur
- 6 Préhomogénéisation
- 7 Broyeur à cru, sécheur
- 8 Homogénéisation

- 9 Préchauffeur, précalcinateur
- 10 Four rotatif
- 11 Refroidisseur
- 12 Stockage clinker
- 13 Ajouts
- 14 Broyeur-séparateur ciment
- 15 Silos à ciment, expédition

VOIE HUMIDE

- 16 Délayeur
- 17 Stockage et homogénéisation
- 18 Stockage pâte
- 19 Electro filtre
- 20 Four rotatif

VOIE SEMI-SÈCHE

- 21 Broyeur à cru, sécheur
- 22 Homogénéisation farine
- 23 Electro-filtre
- 24 Granulateur
- 25 Echangeur LEPOL
- 26 Four rotatif

Figure 1. La fabrication du ciment

❑ Fabrication par « voie sèche »

La fabrication par « voie sèche », la plus utilisée car moins consommatrice d'énergie, comprend :

- la préhomogénéisation par dépôt, en couches horizontales alternées, des deux matériaux et leur reprise frontalement,
- le broyage, séchage, et homogénéisation finale dans un broyeur sécheur rotatif à boulets ou à rouleaux,
- le séchage final et le préchauffage dans des échangeurs « cyclones »,
- la cuisson à 1 450 °C dans un four rotatif.

❑ Fabrication par « voie humide » et « voie semi-humide »

La fabrication par « voie humide » procède tout d'abord par un concassage (comme dans la voie sèche) puis un délayage dans l'eau des constituants du « cru » jusqu'à obtention d'une pâte ayant la composition recherchée. Après homogénéisation, stockage et concentration sur filtre-pressé, la pâte est envoyée dans le four rotatif soit directement, soit en passant préalablement sur une grille de séchage (voie « semi-humide »).

❑ Fabrication par « voie semi-sèche »

La voie dite « semi-sèche » est identique à la voie sèche jusqu'à la sortie du broyeur-sécheur. Au-delà de cet organe, la poudre séchée est regranulée en boulettes de 10 à 12 mm de diamètre dans un granulateur (par adjonction de 10 à 15 % d'eau) avant d'être envoyée sur la grille de séchage comme dans la voie « semi-humide ».

Au terme de la cuisson et après refroidissement, le clinker est mélangé avec ses autres constituants (gypse, laitiers, cendres volantes, etc.), dans les proportions requises, puis finement broyé jusqu'à obtention d'une poudre dont la finesse, définie par la surface spécifique, mesurée par la méthode Blaine, est comprise entre 2 800 et 5 000 cm²/g et ne contenant plus de grains dont la dimension maximale excède 80 µm. Après broyage et refroidissement, le ciment ainsi fabriqué est dirigé vers les organes de stockage et de conditionnement en vue de sa commercialisation.

Les différents ciments et la normalisation

❑ Les ciments courants

La possibilité, en particulier en jouant sur la nature et les proportions de leurs composants, de fabriquer des ciments ayant des propriétés, et donc des domaines d'application, très variables, a rendu indispensable l'élaboration d'une normalisation de ces produits. Cette normalisation est d'ailleurs en voie d'harmonisation au niveau européen et la norme française NF P 15-301 révisée en 1994 a déjà largement intégré l'ensemble des préoccupations de la Communauté Européenne.

Cette norme définit différents types de ciments courants, en fonction de la nature de leurs constituants et des proportions dans lesquelles ils doivent être combinés. Elle prescrit en outre les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques appliquées à ces types de ciment pour en définir les classes. Enfin, elle précise les règles permettant d'évaluer la conformité des produits à ces spécifications.

En particulier, les différents types de ciments courants sont caractérisés et désignés suivant la norme comme indiqué dans le tableau I.

TABLEAU I
Différents types de ciments courants définis dans la norme NF P 15-301

Désignation du type du ciment	Notation	Composition
Ciment Portland	CPA/CEM I	Au moins 95 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants secondaires
Ciment Portland composé	CPJ/CEM II/A	Entre 80 et 94 % de clinker et 6 à 20 % d'autres constituants
	CPJ/CEM II/B	Entre 65 et 79 % de clinker et 21 à 35 % d'autres constituants
Ciment de haut-fourneau	CHF/CEM III/A	Entre 35 et 64 % de clinker et 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau
	CHF/CEM III/B	Entre 20 et 34 % de clinker et 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau
	CLK /CEM III/C	Entre 5 et 19 % de clinker et 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	Entre 65 à 90 % de clinker et 10 à 35 % de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10 % pour ces dernières)
	CPZ-CEM IV/B	Entre 45 et 64 % de clinker et 36 à 55 % de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10 % pour ces dernières)
Ciment au laitier et aux cendres	CLC/CEM V/A	Entre 40 et 64 % de clinker, 18 à 30 % de laitier et 18 à 30 % de cendres volantes ou pouzzolanes
	CLC/CEM V/B	Entre 20 et 39 % de clinker, 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de cendres volantes ou pouzzolanes

Chaque type de ciment est ensuite classé d'après ses propriétés mécaniques et physiques.

- Les **propriétés mécaniques** considérées sont :
 - la résistance normale sur pâte de ciment. C'est la résistance en compression, mesurée à 28 j selon la norme NF EN 196-1 (trois classes de résistance normale sont définies : classe 32,5 N/mm², classe 42,5 N/mm², classe 52,5 N/mm²) ;
 - les résistances au jeune âge. ce sont les résistances en compression mesurées à 2 j selon la norme NF EN 196-1 (deux classes de résistance au jeune âge sont définies : une résistance ordinaire et une résistance élevée notée R).
- Les **propriétés physiques** considérées sont :
 - le temps de début de prise, déterminé selon la norme NF EN 196-3,
 - la stabilité, déterminée selon la norme NF EN 196-3,
 - le retrait à 28 j, déterminé selon la norme NF P 15-433 pour les ciments CPA-CEM I et CPJ-CEM II de certaines classes de résistance.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques et physiques, évoquées précédemment, qui définissent une classe de ciment d'un type donné sont prescrites dans la norme NF P 15- 301 et rappelées dans le tableau II. Ce sont des limites statistiques qui tiennent compte d'un fractile de risque auquel doivent satisfaire les résultats du contrôle du producteur. Les critères de conformité de la norme NF P 15-301 définissent le mode de calcul de la résistance normale.

Enfin, certains types ou classes de ciments doivent être caractérisés par les paramètres chimiques suivants : la perte au feu, les teneurs en oxyde de magnésium, en résidu insoluble, en sulfates, en chlorures et la pouzzolanité.

TABLEAU II
Spécifications mécaniques et physiques relatives aux différentes classes de ciments courants

Classe	Résistance à la compression (N/mm ²)				Retrait des CPA/CEM I CPJ/CEM II 28 j ($\mu\text{m/m}$)	Temps de prise (min)	Stabilité (mm)
	Jeune âge		Normale				
	2 j	7 j	28 j	Limite supérieure			
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite inférieure				
32,5	-	-	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≤ 800	≥ 90	
32,5 R	$\geq 13,5$	-					
42,5	$\geq 12,5$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\leq 1\,000$		≤ 10
42,5 R	≥ 20	-				≥ 60	
52,5	≥ 20	-	$\geq 52,5$	-	-		
52,5 R	≥ 30	-					

□ Les autres ciments

Les autres liants hydrauliques normalisés, donc recevables de ce fait de l'appellation « ciment », sont rappelés dans le tableau III.

TABLEAU III
Caractéristiques générales des ciments non courants

Désignation du type du ciment	Notation	Norme	Commentaires
Ciment de laitier à la chaux	CLX	NF P 15-306	C'est un mélange constitué de soixante-dix parties de laitiers granulé et de (100 -N) parties de chaux hydrauliques + 3 % (maxi) de cendres volantes ou de fillers
Ciment à maçonner	CM		Mêmes constituants actifs que dans le ciment CPA CEM I mais performances mécaniques moindres
Ciment naturel	CN	NF P 15-308	Ciment dont le clinker est obtenu par la cuisson d'un calcaire marneux (au lieu d'une recombinaison calcaire + argile)
Chaux hydraulique naturelle	NHL	NF P 15-310	Liant hydraulique résultant de la cuisson de roches calcaires plus ou moins argileuses mais dont la pulvérisation est principalement obtenue par extinction
Chaux hydraulique artificielle	XHA	NF P 15-312	Liant hydraulique à base de clinker additionné de fillers calcaires et de différents ajouts choisis de manière à lui conférer une grande plasticité, une faible fissurabilité et des résistances moyennes
Ciment prompt naturel	CNP	NF P 15-314	Ciment à prise et durcissement rapides, obtenu par cuisson à température modérée d'un calcaire argileux homogène broyé très finement
Ciment alumineux fondu	CA	NF P 15-315	Ciment obtenu par cuisson jusqu'à fusion d'un mélange principalement composé d'au moins 30 % d'alumine
Ciment pour travaux à la mer	PM	NF P 15-317	Il s'agit de ciments de types CPA-CEM I, CPJ CEM II, CHF CEM III, CLK CEM III/C, CLC CEM V, présentant des teneurs en aluminates tricalciques modérées et de certains ciments prompts et alumineux ayant démontré leur bon comportement dans les ouvrages maritimes
Ciment à faible chaleur d'hydratation et à teneur en sulfures limitée	CP	NF P 15-318	Ce sont des ciments du type CPA CEM I, CPJ CEM II, CLC CEM V dont l'exothermicité de l'hydratation est limitée à 230 J/g à 12 h et dont la teneur en sulfure est plafonnée
Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates	ES	P 15-319	Ces ciments sont de types CPA-CEM I, CPJ-CEM II, CHF-CEM III, CLK-CEM II/, CLC-CEM III/V, avec des critères chimiques légèrement différents de ceux des ciments PM

Production

La production française de ciment en 1994 a été de 20,4 millions de tonnes (340 kg par habitant) et a produit un chiffre d'affaires de l'ordre de 11 milliards de francs (16e rang mondial et 4e rang européen).

Les unités de production sont réparties assez uniformément sur le territoire métropolitain, à l'exception de la Bretagne et du Massif central en raison de l'absence de gisement de calcaire dans ces deux régions (fig. 2).

Pour cette même année, l'utilisation des ciments est répartie entre 65,5 % pour le bâtiment et 34,5 % pour le génie civil.

La construction routière (comprenant traitement de sols, assises de chaussées et couches de chaussées en béton) en a consommé 17,5 % (ce ratio était de 5 % en 1980).

Les investissements industriels ont principalement porté sur :

➤ **la réduction des consommations d'énergie.** En 1994, la consommation énergétique de l'industrie cimentière a encore été de 1,45 millions de TEP auquel s'ajoutent 2,3 millions de kwh d'électricité, ce qui représente environ le tiers du prix de revient du ciment. Le rendement énergétique est cependant passé, au cours des 25 dernières années (notamment par la généralisation de la fabrication par « voie sèche »), de 1 200 à 884 th/t de ciment produite ;

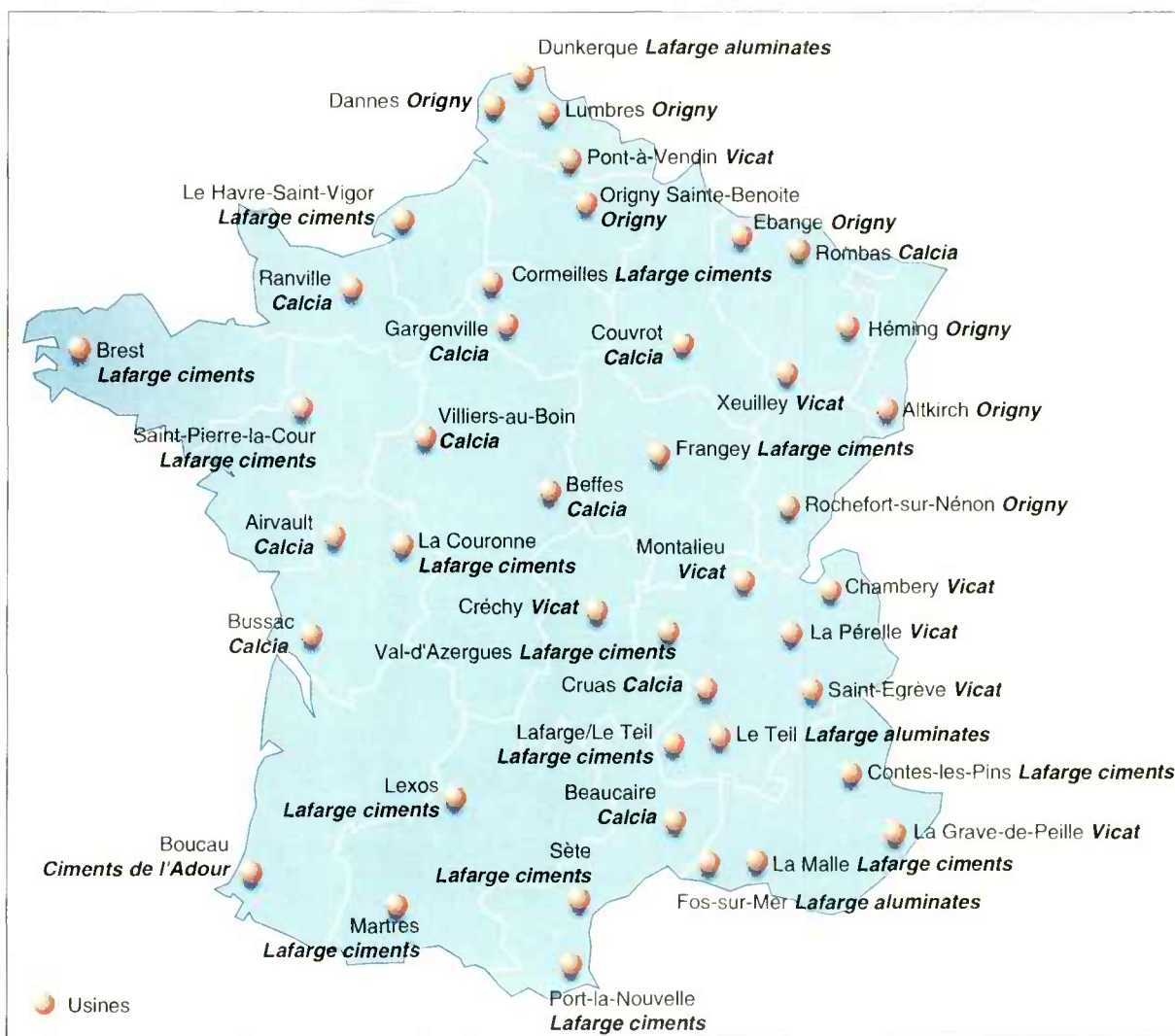


Figure 2. Implantation en France des usines productrices de ciment.

➤ la **diversification des combustibles**. En particulier, une substitution progressive de plus en plus grande du fuel s'est opérée au profit, dans un premier temps, du charbon, (18 % en 1994), puis, depuis le début des années quatre-vingt, au profit du coke de pétrole (28 % en 1994) et surtout, plus récemment, par la recherche d'autres combustibles solides et liquides (52 % en 1994) : sous-produits de raffinage, résidus industriels, produits de récupération (solvants, goudrons, huiles usagées, pneumatiques, etc.) ;

➤ la **protection de l'environnement**. Il faut souligner principalement les aménagements visant la réduction des émissions de poussières qui ont été divisées par un facteur 100 depuis les années soixante, grâce à la mise au point de dispositifs de filtration et de captage des poussières. Le coût de ces installations atteint généralement plus de 10 % de celui de l'unité de fabrication. À signaler également les importantes réalisations qui sont systématiquement entreprises actuellement pour le réaménagement des sites d'extraction.

ORGANISMES PROFESSIONNELS DE L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE

☛ Association technique de l'industrie des liants hydrauliques (ATILH)

7, place de La Défense
La Défense 4
92974 PARIS-LA DÉFENSE CEDEX
☎ 01 55 23 01 30
Télécopie 01 49 67 10 46

☛ CIMbéton - Centre d'information sur le ciment et ses applications

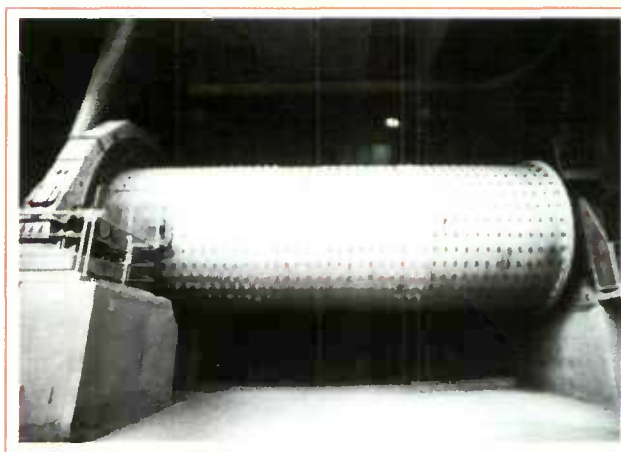
7, place de La Défense
La Défense 4
92974 PARIS-LA DÉFENSE CEDEX
☎ 01 55 23 01 00
Télécopie 01 55 23 01 10

Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC)

7, place de La Défense
La Défense 4
92974 PARIS-LA DÉFENSE CEDEX
☎ 01 55 23 01 23
Télécopie 01 55 23 01 24



Informations complémentaires relatives aux liants hydrauliques routiers ❶



Le broyeur.
Organe essentiel de la fabrication des liants hydrauliques.

En complément des ciments normalisés, se sont développés, depuis maintenant de nombreuses années, des liants dénommés « liants hydrauliques routiers » mis au point spécialement pour une utilisation en traitement des sols en place ou en centrale et pour la confection de matériaux d'assises de chaussées.

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

Définition

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

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

Une prénorme européenne ENV 13-282 a été adoptée en 1999. Cette prénorme, dont l'utilisation n'est pas obligatoire, marque un consensus européen sur la définition des liants hydrauliques routiers.

Domaines d'emploi

Les domaines d'emploi définis par la prénorme ENV 13282 et par la future norme française P 15-108 sont les suivants.

▣ Le traitement des sols

(remblais, PST, plate-forme support de chaussée, couche de forme), conformément au présent guide technique.

❶ Il s'agit de l'appellation préconisée dans la norme européenne ENV 13-282 ainsi que dans la future norme P 15-108 alors que l'appellation usitée dans le guide est « liants spéciaux routiers (LSR) ».

❑ La réalisation de couches d'assise de chaussée

avec des sables traités aux liants hydrauliques routiers, des graves traitées aux liants hydrauliques routiers, conformément à la norme NF P 98-122, ou des graves hydrauliques à hautes performances, selon la norme NF P 98-128, et ce suivant les indications données par la norme NF P 98-115 « Exécution des corps de chaussée ».

Les constituants

Les principaux constituants d'un liant hydraulique routier doivent être sélectionnés parmi les suivants.

❑ Constituants conformes à l'article 4 de la norme NF P 15-301 « Ciments courants - composition, spécifications et critères de conformité »

- clinker Portland (K),
- laitier granulé de haut-fourneau (S),
- pouzzolanes naturelles (Z),
- cendres volantes : cendres volantes siliceuses (V),
- schistes calcinés (T),
- calcaire (L).

❑ Autres constituants

- chaux conformes à la norme NF P 15-311.

Nota

Il est possible d'ajouter des constituants secondaires, dans une proportion n'excédant pas 5 % en poids. Il s'agit de matériaux minéraux naturels, de matériaux minéraux issus des procédés de fabrication du clinker ou dérivés de la sidérurgie, ou des constituants ci-dessus mentionnés, à moins qu'ils n'entrent déjà dans la composition du liant hydraulique routier comme constituants principaux.

Les constituants secondaires améliorent, en raison de leur granulométrie, les propriétés physiques du liant hydraulique routier, telles que l'ouvrabilité ou la rétention d'eau. Ils doivent être préparés convenablement, c'est-à-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés et broyés.

La classification des liants hydrauliques routiers

La possibilité, en particulier en jouant sur la nature et les proportions de leurs constituants, de fabriquer des liants hydrauliques routiers ayant des propriétés, et donc des domaines d'application très variables, a rendu indispensable l'élaboration d'une normalisation de ces produits. Une première étape de normalisation est achevée au niveau européen avec la publication de la prénorme, et la norme française, qui s'en inspirera, est actuellement en cours d'élaboration.

La norme française définit différentes classes de liants hydrauliques routiers. Elle prescrit, en outre, les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques appliquées à ces classes de liants. Enfin, elle précise les règles permettant d'évaluer la conformité des produits à ces spécifications.

Le tableau I donne la classification des liants hydrauliques routiers.

TABLEAU I
Classification des liants hydrauliques routiers

Classe de résistance	Résistance à la compression à 56 j (MPa)	
10	>10	<30
20	>20	<40
30	>30	<50

Déclaration de composition

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

La composition d'un liant hydraulique routier doit respecter, pour chacun des constituants, les valeurs déclarées assorties des tolérances absolues données dans le tableau II.

TABLEAU II
Composition et tolérances enregistrées

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

Exemple

Pour une composition enregistrée comme suit : S 55, K 30, V 10 ; la composition réelle du liant se situerait dans les limites suivantes :

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

Désignation normalisée

Les liants hydrauliques routiers doivent être identifiés sur les documents d'accompagnement à l'aide des lettres HRB et d'un nombre indiquant la classe de résistance.

Exemple

Un liant hydraulique routier conforme à la présente norme, de classe de résistance 10 et dont la composition déclarée est de 55 % de laitier granulé de haut-fourneau, 25 % de cendre volante siliceuse et 15 % de calcaire, est identifié comme suit :

- liant hydraulique routier P 15-108 HRB 10 - S 55, V 25, L 15.

**POUR COMPLÉMENTS
D'INFORMATIONS, CONTACTER :**

☛ CIMbéton
Centre d'information sur le ciment et ses applications

• 7, Place de la Défense
La Défense 4
92974 Paris-La Défense CEDEX
☎ 01 55 23 01 00
Télécopie 01 55 23 01 10



**Méthode rapide
de comparaison
économique
entre la technique
de substitution par
recours aux emprunts
et la technique
du traitement de sol
(pour remblai
et couche de forme)**



La décision du recours au traitement doit toujours résulter d'une analyse technico-économique approfondie ...

La méthode décrite dans cette annexe repose sur les abaques déjà présentés dans la note d'information 59 de juillet 1990 éditée par le SETRA « Traitement des sols à la chaux et/ou aux ciments. Présentation synthétique des aspects techniques et économiques ».

La méthode de comparaison économique proposée permet de prendre en compte les coûts :

- des transports des matériaux d'emprunt,
- des produits de traitement,
- des manipulations (épandage, malaxage, transport, réglage, compactage, etc.) des sols traités en place,
- de mise en œuvre des matériaux d'emprunt (réglage, compactage, etc.),
- d'exploitation des emprunts,

ainsi que, dans le cas des couches de forme, l'économie pouvant être réalisée sur l'épaisseur de cette couche, du fait des caractéristiques mécaniques plus élevées pouvant être obtenues avec un sol traité.

La méthode utilise les abaques présentés sur la figure 1.

Les modalités d'exploitation de ces abaques sont explicitées sur la base de deux exemples concernant respectivement le cas des remblais (fig. 2) et le cas des couches de forme (fig. 3).

La fiabilité de ces abaques dépend évidemment de la précision avec laquelle sont connus les coûts élémentaires pris en compte pour le chantier considéré.

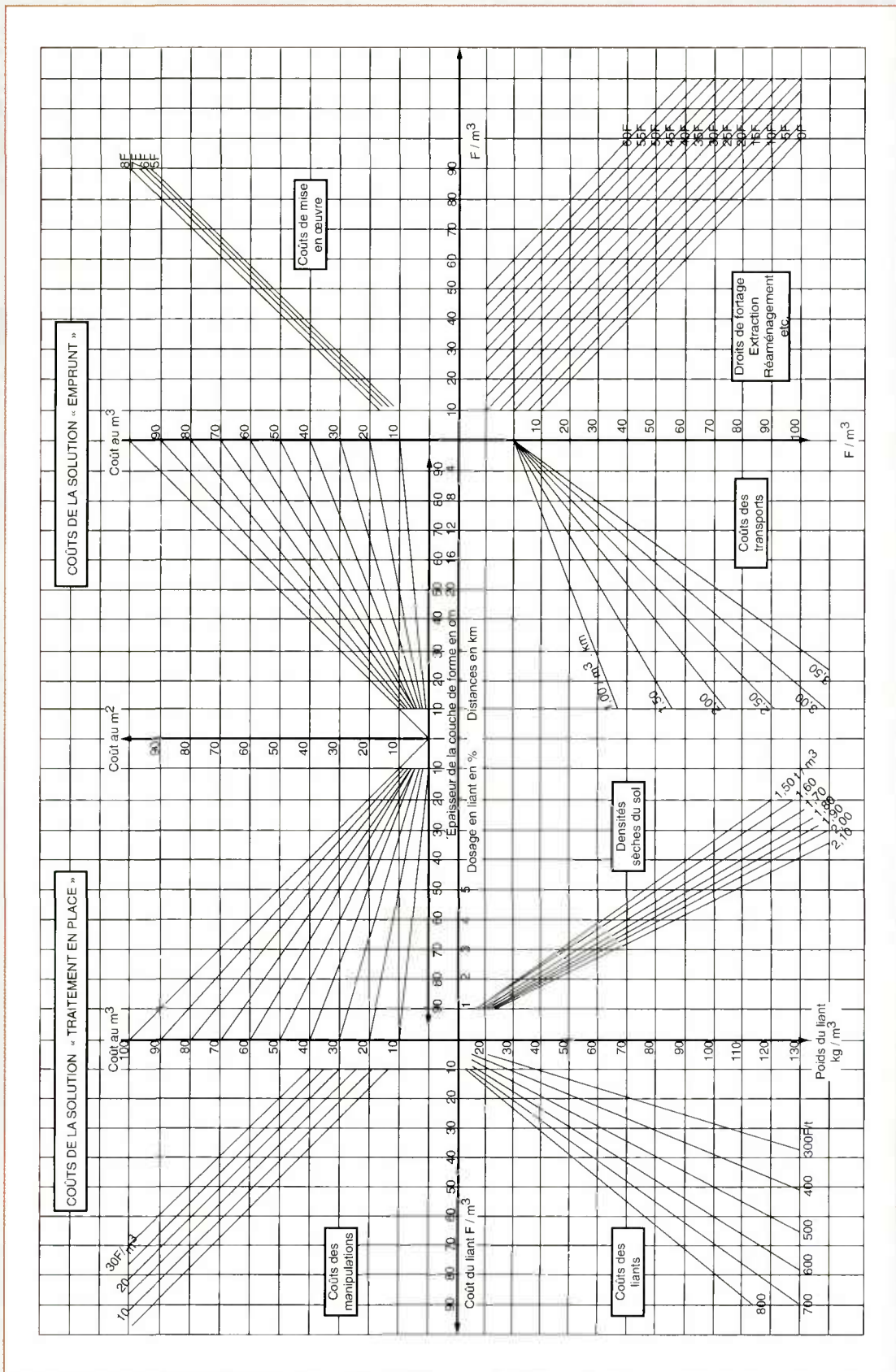


Figure 1. Abaqués permettant une comparaison économique approximative rapide des coûts entre traitement du sol ou recours à des emprunts.

EXEMPLE D'APPLICATION AUX REMBLAIS

La figure 2 présente la manière d'utiliser l'abaque de la figure 1 :

■ Un traitement à 2 % de chaux vive d'un prix de 500 F/t, dans un sol de densité sèche $1,80 \text{ t/m}^3$ et nécessitant des manipulations (épandage, malaxage, transport, régalage, compactage, etc.), d'un coût estimé à 15 F/m^3 , revient à 33 F/m^3 .

■ Dans le cas d'un emprunt situé à 16 km, un coût de transport de $2 \text{ F/m}^3 \cdot \text{km}$, un coût d'exploitation de l'emprunt de 20 F/m^3 et un coût de mise en œuvre de 6 F/m^3 , la solution « emprunt » revient à 57 F/m^3 .

■ En cheminant de manière inverse dans l'abaque, on peut constater (trajet pointillé) que le coût du recours à l'emprunt est plus faible que celui de la solution « traitement » tant que la distance sur laquelle il faut transporter les matériaux d'emprunt reste inférieure à 2 kilomètres.

■ On peut également rechercher, jusqu'à quel dosage en chaux, le coût du traitement apparaît plus faible que celui du recours à un emprunt nécessitant un transport des matériaux sur une distance donnée.

■ etc.

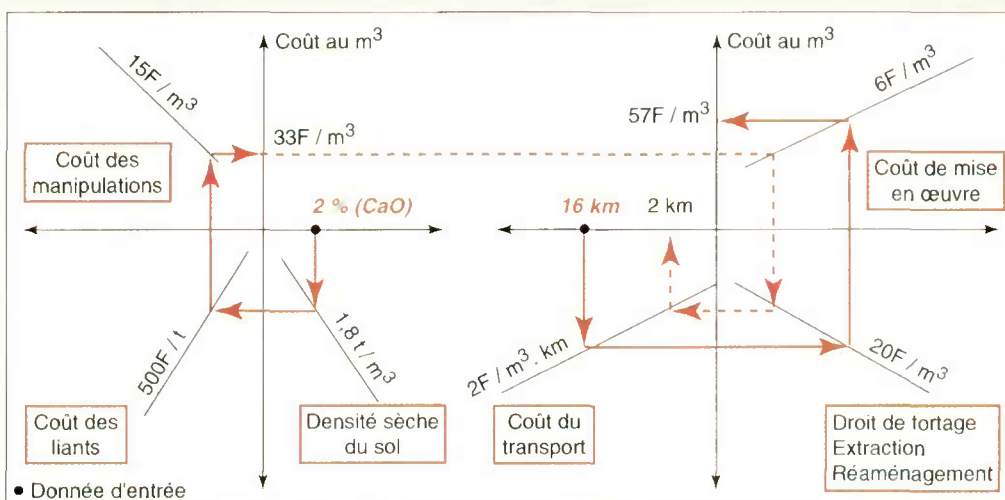


Figure 2. Utilisation des abaques pour une comparaison économique rapide entre traitement et recours aux emprunts dans le cas de la réalisation de remblais.

EXEMPLE D'APPLICATION AUX COUCHES DE FORME

La figure 3 présente la manière d'utiliser l'abaque de la figure 1 :

■ Pour un sol dont la masse volumique en place est de $1,8 \text{ t/m}^3$, un traitement à 5 % de ciment à 500 F/t , un coût des manipulations de traitement de 20 F/m^3 , aboutit à un coût du traitement de 65 F/m^3 , soit un coût de 23 F/m^2 pour une couche de forme traitée de 35 cm d'épaisseur (cas d'une PST2-AR1 et d'une PF2 visée, cf. tableaux du GTR). S'il s'agit d'un traitement mixte, on répète l'opération avec le dosage en chaux retenu et on cumule les résultats.

■ De la même façon, en considérant la partie droite de l'abaque, un matériau non traité issu d'un emprunt situé à 12 km, avec un coût de transport de $2,50 \text{ F/m}^3 \cdot \text{km}$, un coût d'exploitation de l'emprunt de 25 F/m^3 et un coût de mise en œuvre de 5 F/m^3 revient à 60 F/m^3 , soit également un coût de 23 F/m^2 pour une épaisseur de couche de forme de 40 cm (valeur exigée dans le GTR pour la même combinaison PST2-AR1-PF2).

■ Si, les hypothèses de dimensionnement de la structure étaient PST1-AR1 et recherche d'une PF3, et qu'il est acquis que l'effet d'une amélioration à la chaux de l'arase est durable, l'application des abaques précédents et des tableaux et règles de surclassement du GTR montrerait un net avantage économique de la solution traitement (pour les mêmes hypothèses de coûts et de distances de transport).

■ etc.

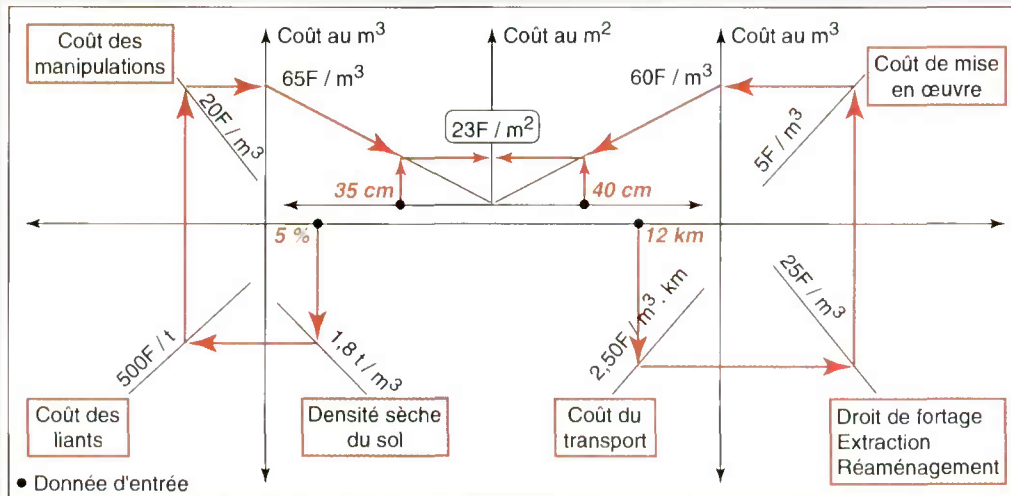


Figure 3. Utilisation des abaques pour une comparaison économique rapide entre traitement et recours aux emprunts dans le cas de la réalisation de couches de forme.

Règles pratiques relatives à la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de chaux ou de liants hydrauliques



Une situation à laquelle le respect de quelques règles élémentaires devrait apporter remède !

Les chantiers de traitement de sols en place et de retraitement de chaussées sont souvent générateurs de poussières de chaux et de liants hydrauliques. Ces poussières peuvent alors causer, dans l'environnement proche du chantier, des nuisances qui sont fonction de la plus ou moins grande sensibilité des supports sur lesquels elles se déposent.

Bien qu'en règle générale, l'acuité des ces nuisances reste à un niveau tolérable, il s'agit d'un problème auquel il convient d'apporter progressivement des solutions de plus en plus efficaces, faute de quoi la technique risque de voir son domaine d'application considérablement réduit, et ce malgré les nombreux avantages qu'elle présente par ailleurs.

Une amélioration très sensible, voire déjà suffisante, de la situation devrait pouvoir être obtenue par l'observation des quelques règles pratiques simples proposées ci-après.

Remarque. Les règles énoncées s'appliquent aux chaux, ciments, LSR, traditionnellement utilisés jusqu'à présent pour le traitement des sols. De toute évidence, certaines d'entre-elles perdent tout ou partie de leur pertinence dans la mesure où, comme cela est le cas de certaines chaux vives, les produits de traitement auront subi, lors de leur fabrication, une modification de leur capacité d'envol réduisant de manière significative leur propension à l'empoussièrement (cf. § A-5.3.).

Distinction des cas de chantier

Il convient de distinguer le cas des chantiers « courants » et celui des chantiers « sensibles ».

□ Chantier courant

Le chantier sera considéré comme un chantier « courant » s'il se déroule à plus de 100 à 150 m des habitations, des implantations industrielles utilisées en permanence par des personnes, des voies de circulation à moyen et fort trafic, des zones de culture horticole, maraîchère ou fruitière en période de floraison tout particulièrement, des zones de pâture avec troupeaux, des aires de stationnement de véhicules ou de produits manufacturés sensibles à l'attaque alcaline.

▣ Chantier « sensible »

Le chantier devra être considéré comme « sensible » si l'une au moins des conditions précédentes n'est pas satisfaite (il le sera d'autant plus que cette distance ne sera pas respectée pour un plus grand nombre des conditions évoquées ci-dessus).

Règles applicables aux chantiers courants

Les règles applicables aux chantiers « courants » définies ci-après doivent être considérées comme des « règles de l'art » supposées connues et admises par tout applicateur de la technique. Il n'y a donc pas lieu de les prescrire en tant que clauses techniques particulières dans les marchés de travaux de traitement de sols.

▣ Règles s'appliquant au stockage et au transvasement des produits de traitement

➤ Le choix de l'implantation de la zone de stockage doit résulter du meilleur compromis entre les nuisances susceptibles d'être provoquées par l'émission de poussières et les distances de transport silos-lieux d'utilisation. Ce choix devra notamment tenir compte des protections naturelles telles que taillis, collines, etc., de la direction des vents dominants, etc. Une justification de ce compromis doit pouvoir être présentée.

➤ Dans le cas général où le transvasement des produits (du véhicule approvisionneur au silo et du silo à l'épandeur) se fait par voie pneumatique, les événements assurant la purge de l'air des cuves et de l'air comprimé véhiculant les produits doivent être raccordés à des filtres (secs ou humides) efficaces et maintenus en bon état de fonctionnement.

➤ Tous les organes utilisés pour le transvasement (tuyaux souples, manchons de raccordement, joints divers) doivent être maintenus en excellent état de fonctionnement, réparés ou remplacés dès qu'une émission de poussières est détectée visuellement. La méthodologie de leur entretien doit être décrite dans une procédure.

➤ Les silos et les épandeurs doivent être équipés d'un dispositif de suivi de remplissage (ou au moins d'alerte en fin de remplissage).

➤ L'aire de stockage doit être maintenue en permanence dans un bon état de propreté ; toute perte significative de produit répandu, notamment sur les parties circulées, doit être évacuée dans les meilleurs délais.

▣ Règles s'appliquant à l'épandage des produits de traitement

➤ L'épandage doit être interrompu dès que la vitesse du vent, mesurée dans toute la mesure du possible sur le lieu de traitement à 1 m du sol (ou à défaut à la station météorologique la plus proche du chantier), dépasse 40 km/h et, de toute façon, lorsque l'on peut observer de visu un transport éolien de produit de traitement dépassant l'emprise du chantier de plus de 50 à 80 mètres ①.

➤ Aucun engin ou véhicule n'est autorisé à circuler sur une surface venant d'être recouverte de produit de traitement. Cette règle vaut aussi pour l'épandeur lui-même qui doit donc pouvoir dans toute la mesure du possible épandre en une passe la totalité de la masse surfacique recherchée.

① Il s'agit ici des poussières de « produit de traitement » et non des poussières « de sols » ni encore moins des dégagements de vapeur d'eau (qui, dans le cas du traitement à la chaux vive de sols humides par temps froid, se confondent facilement).

① Une telle alerte est par ailleurs fortement recommandée vis-à-vis de la précision de l'épandage.

- Réduire au maximum le temps durant lequel le produit de traitement reste épandu sur le sol et, en particulier, ne pas laisser de surface épandue plus de 30 min à 1 h suivant les conditions atmosphériques du moment avant de procéder au malaxage.
- L'étanchéité des épandeurs doit garantir l'absence d'émissions de poussières de produit de traitement durant les transits entre le silo et la zone de réepandage.
- Si la conception de l'engin fait que le produit de traitement subit une chute de plus de 10 cm, l'écoulement doit être canalisé par des jupes jusqu'à 10 cm du sol au minimum. L'efficacité et le bon état de ces organes doivent être assurés pendant toute la durée des opérations de traitement.
- Les épandeurs comportant un dispositif de mise en fluidisation du produit de traitement ou de maintien en pression du produit dans la cuve doivent être équipés d'une alerte de fin d'épandage avant vidange complète de la cuve ①. Cette alerte doit, dans la mesure du possible, commander automatiquement l'arrêt du doseur.

📌 Règles s'appliquant au malaxage du produit de traitement avec le sol

- Le malaxage au moyen de charrues tractées par des engins à chenilles doit être interrompu dans les mêmes circonstances que celles définies pour l'épandage. Pour ces mêmes engins, ne pas dépasser des vitesses de travail de plus de 5 km/h lors des deux premières passes.
- Dans le cas du malaxage à l'aide de pulvérisateur de sol à arbre horizontal, le choix des valeurs des ouvertures des trappes avant et arrière doit résulter en priorité du meilleur comportement vis-à-vis des émissions de poussières (quitte à nécessiter éventuellement une passe supplémentaire).

Règles applicables aux chantiers « sensibles »

Les règles applicables aux chantiers « courants » constituent le minimum à respecter dans le cas des chantiers dits « sensibles » au sens défini précédemment.

En fonction du degré de sensibilité de l'environnement du chantier considéré, il sera le plus souvent nécessaire de compléter ces règles par des stipulations spécifiques complémentaires qui, dans ce cas, devront être explicitement formulées dans les pièces du marché (RPAO, CCTP, CCAP, etc..) ou, de préférence, être formulées au terme de la phase de préparation du marché sur la base des propositions faites sur ce point dans le SOPAQ proposé par l'adjudicataire.

Suivant les chantiers, une liste (non exhaustive) de stipulations complémentaires pouvant être retenues est détaillée ci-après.

📌 Stipulations complémentaires concernant les produits de traitement, leur stockage et leur transvasement

- Utilisation d'un produit de traitement à faible « capacité d'envol ».
- Installation d'un dispositif spécifique permettant de confiner dans un espace donné toute émission de poussière (accidentelle ou chronique) produite au cours des opérations de transvasement des produits de traitement : installation d'une rampe de brumisation et/ou d'une tente au-dessus de la zone critique, par exemple.

❑ Stipulations complémentaires concernant l'épandage

- Interruption de l'épandage dès que le vent est suffisant pour mettre en suspension les particules de produit de traitement et les transporter visiblement à l'extérieur de l'emprise du chantier ❶.
- Équipement de l'épandeur d'un dispositif rabattant les poussières émises au moment de la chute du liant, tel qu'une rampe de brumisation disposée à la périphérie de la zone de déversement de produit de traitement par exemple.
- Carénage des moteurs thermiques de manière à ce que les courants d'air créés par les ventilateurs et échappements de gaz divers soient dirigés vers le haut.

❶ Il s'agit ici des poussières de « produit de traitement » et non des poussières « de sols » ni encore moins des dégagements de vapeur d'eau (qui dans le cas du traitement à la chaux vive de sols humides par temps froid se confondent facilement).

❷ Le type de capteur exigé doit alors être défini.

❑ Stipulations complémentaires concernant le malaxage

- Interruption du malaxage pour les mêmes conditions que celles fixées pour l'épandage.
- Procéder au malaxage dans un délai de 15 min au maximum après l'épandage.
- Carénage des moteurs thermiques de manière à ce que les courants d'air créés par les ventilateurs et échappements de gaz divers soient dirigés vers le haut.
- Prescription du malaxage exclusivement à l'aide de pulvérisateurs à arbre horizontal et à chambre de malaxage.

❑ Stipulations complémentaires concernant la mise en place de moyens de mesure des émissions de poussières

- Installation d'un anémomètre sur le chantier.
- Installation en des points précis de capteurs-enregistreurs ❷ de poussières et relevés de leurs indications.
- etc.



Anémomètre de « poche » permettant la mesure de la vitesse du vent sur le chantier.

Méthodes pratiques pour la vérification de la masse surfacique épanchée (exactitude de l'épandage) et pour la détermination du coefficient de variation d'un épandeur

Principe de la mesure de la masse surfacique de produit de traitement épanché



Pesée de l'épandeur avant et après une séquence d'épandage. Mesure de la surface recouverte du produit de traitement.

Vérification de la masse surfacique épanchée (exactitude de l'épandage)

Cette opération consiste à déterminer la moyenne des valeurs de la masse surfacique de produit épanché, mesurées sur une population d'échantillons donnée et de la comparer à la valeur visée (définie par l'étude de formulation). Il s'agit d'une opération de contrôle de chantier courante. Elle est exécutée par le contrôle intérieur, pour procéder au réglage des épandeurs au début d'une séquence de traitement et à chaque modification de réglage imposée par une variation des conditions de chantier. Le contrôle extérieur peut également être conduit à la réaliser, de manière inopinée.

□ Principe de la méthode

Il consiste à déterminer la masse « M » de produit de traitement épanché sur une surface « S » connue de plate-forme et à calculer le rapport :

$$m_s = \frac{M \text{ (en kg)}}{S \text{ (en m}^2\text{)}}$$

La valeur m_s ainsi déterminée représente donc la moyenne des masses par mètre carré d'une population de « S » mesures ponctuelles réalisées sur une surface de 1 mètre carré.

Cette valeur est comparée à la valeur visée m_v , résultant de l'étude de formulation.

L'exactitude e_x de la prestation est alors définie par :

$$e_x \% = \frac{m_s - m_v}{m_v} \times 100$$

❏ Procédure pratique

L'épandeur étant réglé pour une séquence de traitement donnée, on procède, au cours d'un cycle complet de vidange de l'épandeur, à la pesée de la masse épandue autant que possible sur une même bande d'épandage. La détermination de la masse est réalisée par pesées de l'ensemble des essieux de l'épandeur avant et après épandage sur la surface considérée.

Les pesées sont réalisées avec tout dispositif (pesons portatifs, ponts bascules, etc.) garantissant une précision relative minimale de 1 % de la valeur mesurée.

La surface sur laquelle a été répandu le produit est déterminée par tout moyen et méthode topographiques garantissant une précision relative minimale de 1 % de la valeur mesurée (ce qui revient, dans le cas d'une surface rectangulaire, à mesurer les longueurs des côtés avec une précision relative de 0,5 % de la valeur mesurée).

Remarque.

a. Les méthodes, largement utilisées par le passé, consistant à mesurer des masses surfaciques ponctuelles à partir de pesées du produit recueilli sur des bâches, bacs, etc. de surface connue, doivent être progressivement abandonnées, en raison du nombre forcément limité de ces mesures ponctuelles et du biais introduit par l'impossibilité d'implanter les réceptacles (notamment les bacs) selon une disposition aléatoire.

b. Les épandeurs modernes, comportant un dispositif embarqué de mesure de la masse de la cuve et de la distance parcourue, permettent une détermination automatique et instantanée des valeurs moyennes des masses surfaciques épandues (dans la mesure où l'étalonnage des capteurs et des chaînes de mesure a été vérifié). Il y a donc lieu de recommander leur utilisation, voire de l'imposer dans certains marchés (cf. annexes 8 et 9).

Détermination du coefficient de variation d'un épandeur

Cette opération est à exécuter principalement en phase de préparation de chantier, notamment pour prononcer la convenance des moyens et méthodes présentés par l'entreprise. Elle peut avantageusement être reconduite en cas de changement de l'engin, voire de son conducteur.

❏ Principe de la méthode

Il consiste à mesurer la masse de produit de traitement épandue par unité de surface en des points répartis aléatoirement et en nombre statistiquement suffisant pour constituer une population dont la valeur moyenne « m » et l'écart type « s » sont significatifs.

Le coefficient de variation cherché est exprimé par le rapport :

$$C_v \text{ (en \%)} = \frac{s}{m} \times 100$$

Principe de la détermination du coefficient de variation d'un épandeur

①



Emplacement des bâches sur la section d'essai retenue (remarquer les repères flexibles placés à deux coins opposés de chaque bâche pour faciliter leur localisation après épandage).

②



Épandage du produit de traitement sur la section d'essai.

③



Recherche d'une bâche et emplacement du cadre délimitant la surface prise en compte.

④



Élimination du produit de traitement situé sur la bâche à l'extérieur du cadre.

⑤



Rassemblement du produit au centre de la bâche

⑥



⇒
Pesée du produit contenu dans la bâche.

❑ Procédure pratique

Sur une surface de plate-forme d'environ 100 m de long et 10 à 15 m de large dont la portance est d'au moins 35 MPa, on dépose au hasard (estimation visuelle) une série d'au moins vingt bâches de 1 m x 1 m (± 5 cm) lisses, souples, suffisamment résistantes pour supporter le passage d'un épandeur chargé et possédant un système de préhension permettant de les soulever, pour être pesées, sans perte du produit de traitement.

Il convient également d'avoir prévu un système permettant de retrouver immédiatement chacune de ces bâches une fois recouvertes par le produit de traitement.

On procède alors à l'épandage du produit de traitement sur cette surface en choisissant une masse surfacique représentative du dosage moyen devant être appliqué sur le chantier et tel qu'au minimum deux cycles de vidange-remplissage de l'épandeur soient nécessaires pour recouvrir la surface de la plate-forme d'essai.

Après épandage, on repère à l'aide du système *ad-hoc* l'ensemble des bâches et, sur chacune d'elles, on applique de manière approximativement centrée un cadre suffisamment rigide pour qu'il ne subisse pas de déformations significatives au cours des manipulations décrites ci-après.

La surface extérieure délimitée par le cadre est de 0,5 m², ce qui impose les dimensions fonctionnelles portées sur la figure 1.

- Une fois le cadre positionné bien d'aplomb sur la bâche, à l'aide d'une râclette et d'une balayette on repousse à l'extérieur de la bâche tout le produit de traitement situé en dehors du cadre.
- Après dépose du cadre, chaque bâche est saisie avec son contenu de produit et l'ensemble est pesé par tout dispositif approprié.
- La précision relative de la pesée doit être au minimum de 1 % de la valeur pesée.
- La masse mesurée est doublée pour obtenir la masse par mètre carré.

Ces opérations sont répétées pour chacune des bâches et on calcule alors la moyenne des pesées ainsi que leur écart type pour déterminer le coefficient de variation C_v cherché.

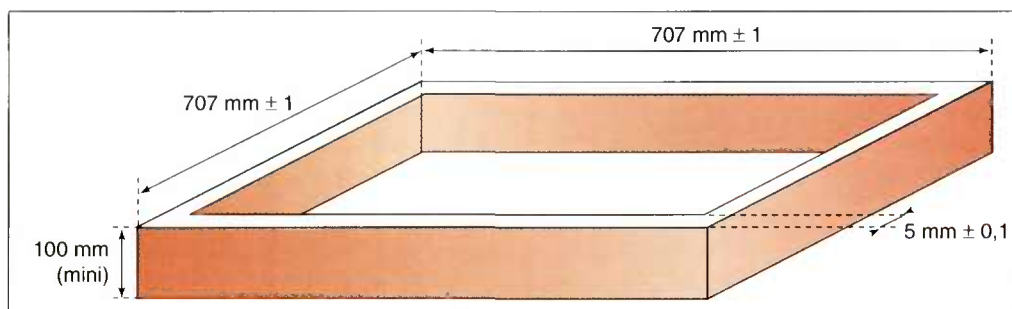


Figure 1. Dimensions fonctionnelles du cadre.

Remarque.

Cette procédure devra être adaptée, le cas échéant, si la conception de l'épandeur fait qu'il soit amené à rouler sur le produit épandu (cas, par exemple, où le déversement du produit se fait entre les essieux de l'épandeur) ①.

① Ce qui, à première vue, n'est le cas pour aucun des engins utilisés actuellement.

Évaluation de la sensibilité des performances aux dispersions d'exécution et méthode d'ajustement du dosage en liant permettant de les compenser



La diversité des opérations élémentaires nécessitées par la réalisation des couches de forme en sol traité génère des dispersions d'exécution dont il faut tenir compte dans le dimensionnement.

L'évaluation des effets des dispersions d'exécution sur le comportement du matériau traité et la possibilité de les compenser par un ajustement du dosage en liant peuvent être étudiées à partir du diagramme (E-R_i) représenté sur la figure 1 et selon la procédure décrite ci-après. Cette dernière est à considérer comme étant un compromis entre rigueur et volume des études à réaliser.

■ Porter, sur le diagramme de la figure 1, les points représentatifs des couples (E-R_i) mesurés pour les différents dosages considérés dans le volet 4 décrit au § C1-4.2. Sur la figure 1, il s'agit des points A, A⁺, A⁻.

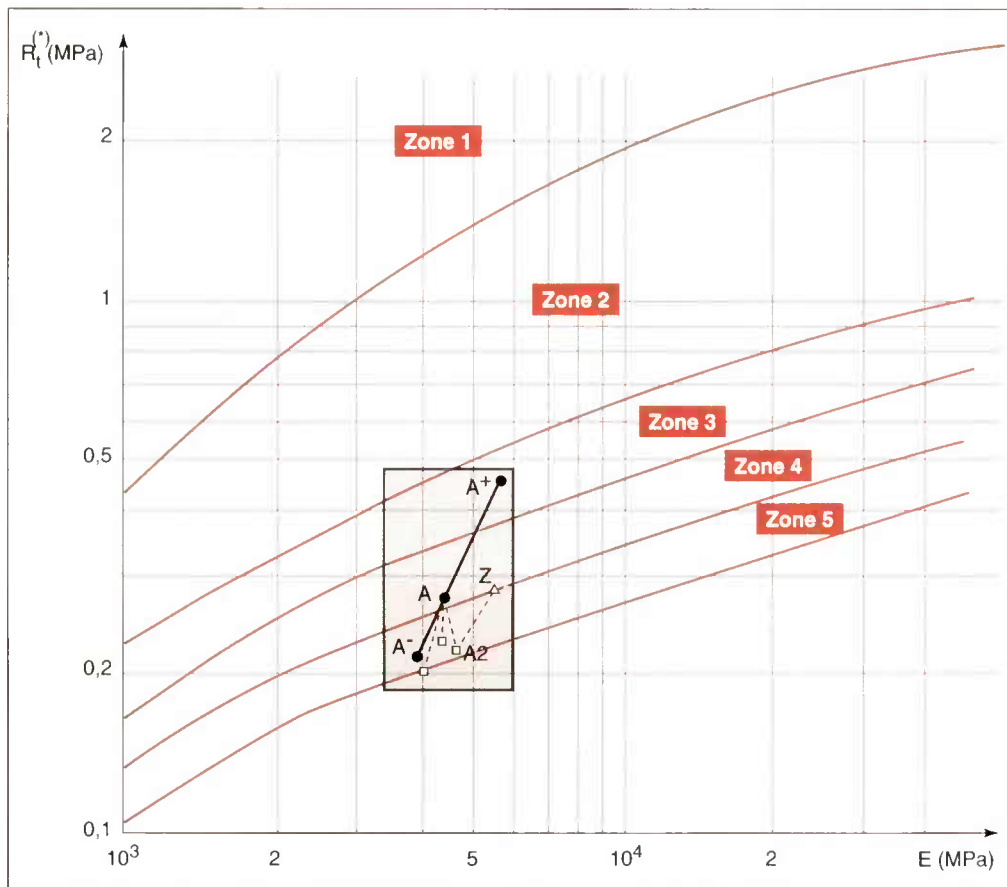
■ Porter ensuite les points représentatifs des couples (E-R_i) obtenus à l'issue de l'étude de sensibilité décrite dans le volet 5 du même § C1-4.2. et pour les modalités de confection des éprouvettes données dans le tableau de la figure 1. Sur la figure 1, il s'agit des points A₁, A₂, A₃.

■ Identifier le couple (E-R_i) qui s'avère le plus défavorable. Sur la figure 1, il apparaît que c'est le couple représenté par le point A₂ (correspondant aux plus faibles compacités).

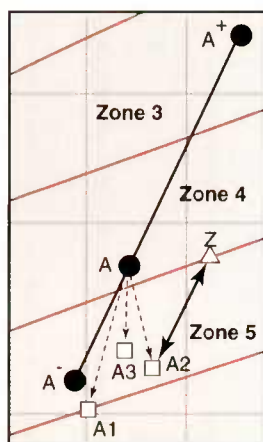
Cette opération permet de comparer la sensibilité relative des différents facteurs d'influence sur les performances du matériau. Elle peut conduire à rechercher une maîtrise stricte de la compacité du matériau traité et/ou de son état hydrique plutôt que de compenser par un surdosage, s'il s'avère que cette maîtrise est réaliste et économiquement nettement plus avantageuse.

Si la compensation, par surdosage, de la réduction des performances dues aux dispersions d'exécution apparaît cependant la plus appropriée, ce surdosage peut être déterminé de la manière suivante.

■ On admet que dans la plage de dosages (d⁺/d⁻) habituellement appliqués pour le chantier considéré (entre 4 et 8 % dans le cas d'un traitement au ciment C_{32,5}, par exemple), les points représentatifs des couples (E-R_i) se déplacent sur une droite lorsque seul le dosage en liant varie (comme cela est représenté sur la figure 1 par la droite A⁻, A⁺).



(*) lorsque les études ont été réalisées à partir d'essais de compression diamétrale, R_t est déterminée à partir de la relation : $R_t = 0,8 R_{tb}$



Modalités retenues dans l'étude de sensibilité

Point	Dosage	Compacité	État hydrique
A^-	d	96 % ρ_{dOPN}	W_{OPN}
A^+	d^+	96 % ρ_{dOPN}	W_{OPN}
A (*)	d	96 % ρ_{dOPN}	W_{OPN}
A_1	0,9 d	96 % ρ_{dOPN}	1,1 W_{OPN}
A_2	0,9 d	94 % ρ_{dOPN}	W_{OPN}
A_3	0,9 d	96 % ρ_{dOPN}	0,9 W_{OPN}

(*) Formule de base

Figure 1. Méthode graphique permettant de déterminer le complément de dosage en liant nécessaire pour compenser les effets défavorables des dispersions d'exécution.

- Dans cette hypothèse, si on fait croître le dosage de la valeur d à la valeur d^* en maintenant constants la compacité et l'état hydrique ayant conduit au point A_2 , on peut considérer que les points représentatifs des couples (E-R₁) se déplacent sur la parallèle à $A^- A^+$ menée du point A_2 .
- Pour déterminer le surdosage permettant de compenser les effets défavorables des dispersions d'exécution, il convient donc de mener par A_2 la parallèle à $A^- A^+$ qui intercepte en Z la frontière de la zone 4 (qui est celle supposée visée). La valeur du dosage corrigé d_c peut alors être calculée par une relation de proportionalité directe entre les longueurs des segments $A_2 Z$ et $A^- A^+$ selon la formule :

$$d_c = d + \left(d^* - d \right) \frac{A_2 Z}{A^- A^+}$$

- Inversement, s'il s'avère qu'aucun des points A_1 , A_2 , A_3 , ne franchit la limite inférieure de la zone visée (ce qui signifie que le dosage choisi pour l'étude de sensibilité était surévalué), la même démarche peut alors être suivie pour calculer la réduction du dosage qui respecte le niveau de performances recherché, même lorsque l'effet des dispersions d'exécution est le plus défavorable.



Éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement pour réemploi en remblai des sols humides sensibles à l'eau



Les stipulations proposées, ci-après, découlent principalement des éléments présentés dans le § B-1.6. et, notamment, dans les tableaux B-V, B-VI et B-VII de la partie B « Le traitement des sols en remblais ».

Elles sont présentées selon le mode classique d'un Cahier des clauses techniques particulières type (CCTP type), à savoir :

- Dans la **colonne de gauche** figurent les **stipulations proprement dites**.
- Dans la **colonne de droite** et en correspondance de chaque stipulation, figurent **différents commentaires** destinés à guider le rédacteur du CCTP d'un chantier donné dans le choix et le contenu des stipulations adaptées au chantier qui le concerne.

L'objet de cette annexe se limite aux stipulations relatives au traitement pour réemploi en remblai des sols humides sensibles à l'eau. Pour cette application, il est proposé trois rédactions distinctes, correspondant aux trois schémas proposés au § B-1.6.1. pour établir une répartition équitable des aléas sur les quantités de matériaux à traiter entre le maître de l'ouvrage et l'entrepreneur.

Pour une plus grande facilité d'utilisation, chaque rédaction est autonome, c'est-à-dire qu'elle comporte l'ensemble des stipulations correspondant à chacun des trois schémas considérés, mais en contrepartie, on comprendra qu'il était nécessaire de reformuler les stipulations qui se retrouvent dans les trois schémas.

Pour rédiger les stipulations relatives au traitement des sols appliqué à la réalisation de certaines zones particulières de remblai qui sont développées dans le § B-2 (amélioration de la PST, stabilisation de matériaux évolutifs, etc.), il conviendra davantage de s'inspirer des éléments présentés dans l'annexe 9.

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

Commentaires

Rédaction 1

Cette rédaction est adaptée aux marchés pour lesquels les enjeux (techniques, économiques, de délai, etc.) du traitement peuvent être considérés comme mineurs et dont l'étude géotechnique comporte les éléments permettant une estimation réaliste des états hydriques qui seront effectivement constatés durant la période des travaux. Cette étude doit pouvoir être utilisée par le soumissionnaire pour apprécier, avec un risque normalement acceptable, les quantités de matériaux à traiter et de produit de traitement nécessaires

L'intérêt de cette rédaction est de ne demander qu'une implication légère du maître d'œuvre durant l'exécution de la tâche car les actions de contrôle des stipulations qu'elle implique restent d'ampleur limitée et ne présentent pas de difficultés techniques ou opérationnelles particulières

Enfin, elle permet de rémunérer simplement la mise en remblai par un prix unique incluant le traitement lorsque celui-ci s'avère nécessaire

LES SOLS À TRAITER

Les matériaux sensibles à l'eau destinés à la construction des remblais devront être traités si :

- a.- leur IPI au moment de la mise en œuvre est :
≤ %
- b.- leur portance après compactage (mesure à l'essai à la plaque ou à la dynaplaque) est :
≤ MPa
- c.- la profondeur d'ornièrè laissée par les engins d'approvisionnement (tombereaux, décapeuses, etc.) est :
• cm

La vérification de la nécessité du recours au traitement est réalisée selon :

- a. - la procédure définie dans le PAQ
- b. - la procédure suivante :

LES SOLS À TRAITER

Pour une classe de sols donnée, et autant que possible pour un marché donné, il ne faut retenir qu'une seule des trois propositions a., b., c. envisagées (à choisir en fonction du contexte du chantier)

Pour fixer les valeurs à spécifier, on pourra, à défaut d'éléments mieux adaptés au chantier, reprendre les valeurs indiquées dans le GTS § B-1.6.1.

La procédure de vérification de la nécessité de procéder au traitement du sol doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :

- lorsque le paramètre retenu est l'IPI, la fréquence minimale est d'une mesure pour 2000 m³ mis en remblai
- lorsque le paramètre retenu est un module à la plaque ou à la dynaplaque, la fréquence minimale est d'une mesure pour 1000 m² de couche élémentaire de remblai

LES PRODUITS DE TRAITEMENT

La nature du (ou des) produit(s) de traitement utilisé(s) doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre

LES PRODUITS DE TRAITEMENT

En règle générale, cette stipulation est à formuler dans le chapitre III du CCTP, Article « Produits pour le traitement des sols »

Le produit le mieux adapté à cette application est en général la chaux vive calcique telle que définie dans la norme NF P 98-101, mais, dans certains contextes, d'autres produits peuvent également être utilisés (chaux éteinte, liants routiers, cf. GTS § B-1.1.a.)

LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS

LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS

Les stipulations concernant le compactage des sols traités étant identiques à celles des sols non traités, elles peuvent être formulées dans l'article relatif au compactage des matériaux utilisés pour la construction des remblais selon l'une ou l'autre des formulations proposées dans le texte ci-contre

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

Commentaires

Le compactage des sols traités :

a.- doit être réalisé conformément aux modalités figurant dans les tableaux du GTR pour chacune des classes de sols concernées

La vérification du respect des modalités d'utilisation des compacteurs est réalisée selon la procédure définie dans le PAQ

b.- doit permettre d'obtenir en tout point de la couche compactée un taux de compactage minimal de 95 % (exprimé par le rapport entre la masse volumique apparente sèche du sol traité et sa masse volumique à la teneur en eau de l'optimum proctor normal)

La vérification de l'obtention du taux de compactage exigé est réalisée selon :

a.- la procédure définie dans le PAQ

b.- la procédure suivante :

Lorsque, dans un marché, les deux propositions a. et b. sont envisagées, les natures de matériaux ou les ouvrages ou parties d'ouvrages où elles s'appliquent respectivement doivent être définies.

La stipulation des deux propositions a. et b. sur un même ouvrage ou partie d'ouvrage est à proscrire

La proposition a. est à retenir dans le cas général. Elle impose la connaissance de l'identification (en nature et état) des sols mis en œuvre et des dispositions particulières (contrôlographes étalonnés, jauge d'épaisseur des couches élémentaires, etc.) permettant la vérification des modalités d'utilisation des compacteurs

La proposition b. est réservée aux petits chantiers ainsi qu'aux ouvrages exigus, sur lesquels le contrôle de la spécification précédente n'est pas réalisable avec une fiabilité suffisante

Sa formulation dans le marché n'est cependant acceptable que si la granularité du sol satisfait les exigences de l'essai proctor et que si l'on dispose, au moment de l'exécution, des moyens (matériel et personnel) suffisants pour en contrôler le respect

La procédure de l'action de vérification de l'obtention du taux de compactage doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :

- les appareils de mesure de la densité en place devront avoir une profondeur d'investigation au moins égale à 80 % de l'épaisseur de la couche mise en œuvre
- le contrôle intérieur doit être en mesure de justifier les valeurs des densités de référence proctor normal considérées dans le calcul des taux de compactage affichés
- la fréquence des essais de contrôle doit être d'au moins un essai pour 1000 m³ de sol traité mis en remblai

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les règles pratiques visant la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement énoncées dans l'annexe 5 du GTS pour les chantiers courants s'appliquent et sont complétées par les dispositions suivantes :

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Dans le cas de chantiers à environnement sensible, les règles pratiques indiquées dans l'annexe 5 peuvent être complétées par des dispositions complémentaires telles que :

- l'interdiction de traiter entre tel et tel profil ou sinon avec un produit à faible capacité d'envol
- l'installation d'un anémomètre-enregistreur à proximité du chantier de traitement
- la réalisation d'une protection particulière de la zone de stockage
- etc.

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

Commentaires

Rédaction 2

Cette rédaction est principalement adaptée aux chantiers dont le traitement présente des enjeux (technique, économique et vis-à-vis des délais) déterminants et pour lesquels il est illusoire de considérer que l'étude géotechnique puisse garantir l'entrepreneur vis-à-vis d'aléas importants sur les quantités de matériaux à traiter et de produits de traitement à fournir (cf. schéma 2 décrit dans le GTS § B-1.6.1.)

Elle prévoit une rémunération de la tâche calculée d'après les quantités réelles de matériau traité et de produit de traitement consommé. Cette rédaction protège donc l'entrepreneur de la majeure partie des risques liés aux aléas géotechniques et météorologiques dès lors qu'un ordre de grandeur réaliste des quantités prévisibles de matériaux à traiter est indiqué dans le DCE. Elle permet d'optimiser les quantités de matériaux traités et de produit de traitement consommées

En contrepartie, elle impose une implication forte du maître d'œuvre dans la formulation des stipulations, le suivi et le contrôle de la tâche

Lorsque cette rédaction est retenue, il est en général avantageux de prévoir, dans la définition du prix unitaire de la tâche, une plus-value permettant la rémunération d'une passe (ou série de passes) de malaxage supplémentaire(s) au-delà du nombre minimal prescrit

LES SOLS À TRAITER

Les matériaux sensibles à l'eau humides nécessitant un traitement sont désignés au fur et à mesure de l'exécution du chantier par le maître d'œuvre

LES SOLS À TRAITER

Dans certains cas, qu'il lui convient d'apprécier, le maître d'œuvre peut éventuellement déléguer cette responsabilité au responsable du contrôle intérieur

LES PRODUITS DE TRAITEMENT

La nature du (ou des) produit(s) de traitement utilisé(s) est la suivante :

LES PRODUITS DE TRAITEMENT

En règle générale, cette stipulation est à formuler dans le chapitre III du CCTP, Article « Produits pour le traitement des sols »

Le produit le mieux adapté à cette application est en général la chaux vive calcique telle que définie dans la norme NF P 98-101, mais, dans certains contextes, d'autres produits peuvent également être utilisés (chaux éteinte, liants routiers, cf. GTS § B-1.1.a.)

La qualité du produit de traitement est vérifiée selon :

- a. - la procédure définie dans le PAQ
- b. - la procédure suivante :

La procédure de l'action de vérification de la qualité du produit de traitement doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés (cf. tab. B-VII du GTS) :

- dans le cas de la chaux vive : exécution d'une mesure de la réactivité par 200 à 500 t de produit livré
- dans le cas des LSR : obligation à l'entreprise de procéder à des prélèvements de quelques échantillons (2 à 5) de produit échelonnés sur la durée du chantier et conservés jusqu'à la fin du chantier

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMLAI

Texte	Commentaires
<p>LE STOCKAGE DES PRODUITS DE TRAITEMENT</p>	<p>LE STOCKAGE DES PRODUITS DE TRAITEMENT</p>
<p>La capacité de stockage du produit de traitement à installer sur le chantier est d'au moins tonnes</p>	<p><i>Une capacité de stockage équivalente à la consommation d'une journée moyenne de travail peut être exigée en général. Cette capacité peut également ne pas être imposée dans le CCTP, mais seulement définie dans le PAQ</i></p>
<p>LE(S) DOSAGE(S) À APPLIQUER</p>	<p>LES(S) DOSAGE(S) À APPLIQUER</p>
<p>Le dosage en produit de traitement est fixé par le maître d'œuvre Pour ce faire, le contrôle intérieur doit prélever des échantillons de sol dans les déblais ou emprunts concernés par le traitement au moins ... jours avant leur extraction</p>	<p><i>La méthodologie décrite dans le GTS § B-1.3.1 b., précisée si nécessaire dans le PAQ, pourra être appliquée pour fixer ce dosage À défaut d'autres éléments mieux adaptés au chantier, un délai de 1 à 2 j avant l'extraction est à stipuler en général</i></p>
<p>LE LIEU DE TRAITEMENT</p>	<p>LE LIEU DE TRAITEMENT</p>
<p>Le traitement est réalisé : a. - - dans le déblai pour les matériaux des déblais suivants : - sur le remblai pour les matériaux provenant des déblais suivants : b. - conformément aux instructions du maître d'œuvre</p>	<p><i>Le lieu du traitement ne doit être prescrit dans le CCTP (proposition a.) que si l'étude a montré qu'il y a un réel intérêt à le faire (cf. GTS § B-1.5.3.) Dans le cas contraire, retenir la proposition b.</i></p>
<p>LES ATELIERS DE TRAITEMENT</p>	<p>LES ATELIERS DE TRAITEMENT</p>
<p>Le traitement est réalisé avec les engins suivants : • Épandage Il est réalisé au moyen d'épandeur(s) à doseur volumétrique asservi à la vitesse de déplacement de l'engin et présentant un coefficient de variation (CV) ≤%</p>	<p>• Épandage <i>Une valeur du CV ≤ 15 % est acceptable en général, mais des valeurs plus faibles peuvent être exigées pour certains chantiers (gros chantiers pouvant être rigoureusement organisés, matériaux homogènes permettant une minimisation fine de la consommation du produit de traitement, etc.)</i></p>
<p>Le CV est déterminé selon la méthodologie suivante : La détermination du CV est réalisée lors du constat de la convenance des méthodes et moyens et renouvelée en cas de changement de l'épandeur, de conducteur ou d'intervention significative sur le doseur Pendant toute la durée de son utilisation, chaque épandeur doit être maintenu dans l'état de fonctionnement ayant reçu l'acceptation du maître d'œuvre (ou son délégué pour la tâche) lors du constat de convenance La masse surfacique de produit de traitement à épandre doit être accordée avec : - la valeur du dosage indiquée par le maître d'œuvre - l'épaisseur de la couche malaxée - la masse volumique apparente sèche du sol en place (avant traitement)</p>	<p><i>Sauf à disposer d'éléments mieux adaptés au chantier, la méthodologie décrite dans le GTS (annexe 6) pourra être prescrite</i></p>

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

La masse volumique apparente sèche du sol en place (avant traitement) est déterminée par le contrôle intérieur selon :

a. - la procédure décrite dans le PAQ

b. - la procédure suivante

La masse surfacique de produit de traitement épanché est déterminée selon la méthodologie suivante :

La fréquence des vérifications de la masse surfacique de produit de traitement épanché doit être d'au moins :

- une vérification par changement significatif du dosage commandé par le maître d'œuvre
- une vérification après une interruption de travail de l'épandeur dépassant 24 heures

• Malaxage

Il est réalisé au moyen de malaxeur(s) constitué(s) par :

.....

.....

Le nombre de passes doit être au moins de :

..... passes. avec les malaxeurs suivants :

.....

.....

Pendant toute la durée de son utilisation, chaque malaxeur doit être maintenu dans l'état de fonctionnement accepté par le maître d'œuvre lors du constat de la convenance des méthodes et moyens

Toute technique de traitement n'utilisant ni char-rues ni pulvérisateurs pour malaxer le sol avec le produit de traitement doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre à l'issue d'une démonstration réalisée lors du constat de la convenance des méthodes et moyens

Commentaires

La procédure de détermination de la masse volumique apparente sèche du sol en place doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :

- la profondeur d'investigation de l'appareil de mesure doit être au moins de 80 % de l'épaisseur de la couche de sol malaxée
- le nombre de mesures sera d'au moins une mesure pour 1000 m² de sol traité

Sauf à disposer d'éléments mieux adaptés au chantier, la méthodologie décrite dans le GTS (annexe 6) pourra être prescrite

Cette stipulation est sans objet lorsqu'il est prévu que cette action sera réalisée par le contrôle extérieur, situation qui doit être recommandée dans le cas de la rédaction 2

• Malaxage

La stipulation d'engins de malaxage d'un type donné doit être justifiée par les particularités du chantier, en particulier lorsqu'il est acquis que l'emploi de pulvérisateurs s'avère pertinent (cas des sols A₃, par exemple)

Les engins de malaxage prescrits doivent être définis par leur morphologie (charrue à disques, à socs, pulvérisateur, etc.) et par leur profondeur d'action maximale

L'intérêt de stipuler un nombre minimal d'engins de malaxage est encore plus discutable, mais peut être justifiée, pour des chantiers importants notamment pour une meilleure garantie du respect des délais

Lorsqu'un nombre de passes minimal est stipulé, il doit être associé à un type d'engin de malaxage donné (par exemple, trois passes dans le cas d'une charrue à disques... cf. GTS § I-441)

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

Commentaires

LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS

LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS

Le compactage des sols traités :

a. - doit être réalisé conformément aux modalités figurant dans les tableaux du GTR pour chacune des classes de sols concernées

La vérification du respect des modalités d'utilisation des compacteurs est réalisée selon la procédure définie dans le PAQ

b.- doit permettre d'obtenir, en tout point de la couche compactée, un taux de compactage minimal de 95 % (exprimé par le rapport entre la masse volumique apparente sèche du sol traité et sa masse volumique maximale proctor normal)

La vérification de l'obtention du taux de compactage exigé est réalisée selon :

- a. - la procédure définie dans le PAQ
- b. - la procédure suivante :

Les stipulations concernant le compactage des sols traités étant identiques à celles des sols non traités, elles peuvent être formulées dans l'article relatif au compactage des matériaux utilisés pour la construction des remblais selon l'une ou l'autre des formulations proposées dans le texte ci-contre

Lorsque, dans un marché, les deux propositions a. et b. sont envisagées, les natures de matériaux ou les ouvrages ou parties d'ouvrages où elles s'appliquent respectivement doivent être définis. La stipulation des deux propositions a. et b. sur un même ouvrage ou partie d'ouvrage est en effet à proscrire

La proposition a. est à retenir dans le cas général. Elle impose la connaissance de l'identification (en nature et état) des sols mis en œuvre et des dispositions particulières (contrôlegraphes étalonnés, jauge d'épaisseur des couches élémentaires, etc.) permettant la vérification des modalités d'utilisation des compacteurs

La proposition b. est réservée aux petits chantiers ainsi qu'aux ouvrages exigus, sur lesquels le contrôle de la spécification précédente n'est pas réalisable avec une fiabilité suffisante

Sa formulation dans le marché n'est cependant acceptable que si la granularité du sol satisfait les exigences de l'essai proctor et que si l'on dispose au moment de l'exécution des moyens (matériel et personnel) suffisants pour en contrôler le respect

La procédure de l'action de vérification de l'obtention du taux de compactage doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :

- les appareils de mesure de la densité en place devront avoir une profondeur d'investigation au moins égale à 80 % de l'épaisseur de la couche mise en œuvre
- le contrôle intérieur doit être en mesure de justifier les valeurs des densités de référence proctor normal considérées dans le calcul des taux de compactage affichés,
- la fréquence des essais de contrôle doit être d'au moins un essai pour 1000 m² de sol traité mis en remblai

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les règles pratiques visant la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement énoncées dans l'annexe 5 du GTS pour les chantiers courants s'appliquent et sont complétées par les dispositions suivantes :

.....
.....
.....

Dans le cas de chantiers à environnement sensible, les règles pratiques indiquées dans l'annexe 5 peuvent être complétées par des dispositions complémentaires telles que :

- l'interdiction de traiter entre tel et tel profil ou sinon avec un produit à faible capacité d'envol
- l'installation d'un anémomètre-enregistreur à proximité du chantier de traitement
- la réalisation d'une protection particulière de la zone de stockage
- etc.

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte

Commentaires

Rédaction 3

Cette rédaction est applicable à la majorité des chantiers. Comme la rédaction 2, elle implique une rémunération spécifique de la tâche calculée d'après les quantités effectives de matériau traité et de produit de traitement consommées

Elle protège l'entrepreneur de la majeure partie des risques liés aux aléas géotechniques et météorologiques dès lors qu'un ordre de grandeur réaliste des quantités prévisibles est indiqué dans le DCE. Elle permet une optimisation généralement satisfaisante des quantités de matériaux traités et de produit de traitement consommées, sans demander en contrepartie une forte implication du maître d'œuvre durant l'exécution de la tâche. Cette implication comporte tout de même, comme dans le cas de la rédaction 1, la vérification de l'obtention d'une portance minimale, mais également de l'arrêt du traitement lorsque la portance atteint une valeur suffisante pour assurer la stabilité de l'ouvrage. De plus, étant donné que l'entrepreneur est rémunéré de la quantité totale de produit de traitement consommé, le maître d'œuvre doit également stipuler certaines caractéristiques des ateliers qui seront utilisés et, le cas échéant, certains aspects de la technique d'exécution qu'il souhaite faire appliquer

LES SOLS À TRAITER

Les matériaux sensibles à l'eau destinés à la construction des remblais devront être traités si :

- a. - leur IPI au moment de la mise en œuvre est \leq %
- b. - leur portance après compactage (mesure à l'essai à la plaque ou à la dynaplaque) est \leq MPa
- c. - la profondeur d'ornièrè laissée par les engins d'approvisionnement (tombereaux, décapeuses, etc.) est \geq cm

La vérification de la nécessité du recours au traitement est réalisée selon :

- a. - la procédure définie dans le PAQ
- b. - la procédure suivante :

Inversement, le traitement des matériaux sensibles à l'eau destinés à la construction des remblais doit être interrompu ou éventuellement poursuivi avec réduction du dosage en produit de traitement si :

- a.- leur IPI au moment de la mise en œuvre est \geq %

LES SOLS À TRAITER

Pour une classe de sols donnée, et autant que possible pour un marché donné, il ne faut retenir qu'une seule des trois propositions a., b., c. envisagées (à choisir en fonction du contexte du chantier, cf. GTS § B-1.6.1.

Pour fixer les valeurs à spécifier, on pourra, à défaut d'éléments mieux adaptés au chantier, reprendre les valeurs indiquées dans le GTS § B-1.6.1.

La procédure de l'action de vérification de la nécessité de procéder au traitement du sol doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)

Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :

- lorsque le paramètre retenu est l'IPI, la fréquence minimale est d'une mesure pour 2000 m³ mis en remblai
- lorsque le paramètre retenu est un module à la plaque ou à la dynaplaque, la fréquence minimale est d'une mesure pour 1000 m³ de couche élémentaire de remblai

Pour une classe de sols donnée, et autant que possible pour un marché donné, il ne faut retenir qu'une seule des trois propositions a., b., c. envisagées (à choisir en fonction du contexte du chantier). Il est conseillé de se référer au même paramètre que celui retenu pour décider du déclenchement du traitement

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte	Commentaires
<p>b. - leur portance après compactage (mesure à l'essai à la plaque ou à la dynaplaque) est \geq MPa</p> <p>c. - la profondeur d'ornièrre laissée par les engins d'approvisionnement (tombereaux, décapeuses, etc.) est \leq cm</p>	<p><i>Pour fixer les valeurs à spécifier, on pourra, à défaut d'éléments mieux adaptés au chantier, reprendre les valeurs indiquées dans le GTS § B-1.6.1.</i></p>
<p>La vérification de la nécessité d'interrompre le traitement, ou de réduire le dosage, est réalisée selon :</p> <p>a. - la procédure définie dans le PAQ</p> <p>b. - la procédure suivante :</p>	<p><i>La procédure de l'action de vérification de la nécessité d'interrompre ou de réduire le dosage doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)</i></p> <p><i>Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - lorsque le paramètre retenu est l'IPI, la fréquence minimale est d'une mesure pour 2000 m³ mis en remblai - lorsque le paramètre retenu est un module à la plaque ou à la dynaplaque, la fréquence minimale est d'une mesure pour 1000 m² de couche élémentaire de remblai
<p>LES PRODUITS DE TRAITEMENT</p>	<p>LES PRODUITS DE TRAITEMENT</p>
<p>La nature de (ou des) produit(s) de traitement utilisé(s) est la suivante :</p>	<p><i>En règle générale, cette stipulation est à formuler dans le chapitre III du CCTP, Article, « Produits pour le traitement des sols »</i></p>
<p>La qualité du produit de traitement est vérifiée selon :</p> <p>a. - la procédure définie dans le PAQ</p> <p>b. - la procédure suivante :</p>	<p><i>Le produit le mieux adapté à cette application est en général la chaux vive calcique telle que définie dans la norme NF P 98-101, mais, dans certains contextes, d'autres produits peuvent également être utilisés (chaux éteinte, liants routiers, cf. GTS § B-1.1a.)</i></p> <p><i>La procédure de l'action de vérification de la qualité du produit de traitement doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)</i></p> <p><i>Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés (cf. tab. B-VII du GTS) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - dans le cas de la chaux vive : exécution d'une mesure de la réactivité par 200 à 500 t de produit livré - dans le cas des LSR : obligation à l'entreprise de procéder à des prélèvements de quelques chantillons (2 à 5) de produit échelonnés sur la durée du chantier et conservés jusqu'à la fin du chantier
<p>LE STOCKAGE</p>	<p>LE STOCKAGE</p>
<p>La capacité de stockage du produit de traitement à installer sur le chantier est d'au moins tonnes</p>	<p><i>Une capacité de stockage équivalente à la consommation d'une journée moyenne de travail peut être exigée en général. Cette capacité peut également ne pas être imposée dans le CCTP, mais seulement décidée lors de l'établissement du PAQ</i></p>

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte	Commentaires
<p>LE LIEU DE TRAITEMENT</p> <p>Le traitement est réalisé :</p> <p>a. - dans le déblai pour les matériaux des déblais suivants : - sur le remblai pour les matériaux provenant des déblais suivants :</p> <p>b. - conformément aux instructions du maître d'œuvre</p>	<p>LE LIEU DE TRAITEMENT</p> <p><i>Le lieu du traitement ne doit être prescrit dans le CCTP (proposition a.) que si l'étude a montré qu'il y a un réel intérêt à le faire (cf. GTS § B-1.5.3.)</i></p> <p><i>Dans le cas contraire, retenir la proposition b.</i></p>
<p>LES ATELIERS DE TRAITEMENT</p> <p>Le traitement est réalisé avec les engins suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Épandage <p>Il est réalisé au moyen d'épandeur(s) à doseur volumétrique asservi à la vitesse de déplacement de l'engin et présentant un coefficient de variation (CV) ≤%</p> <p>Le CV est déterminé selon la méthodologie suivante : </p> <p>La détermination du CV est réalisée lors du constat de la convenance des méthodes et moyens et renouvelée en cas de changement de l'épandeur ou d'intervention significative sur son doseur</p> <p>Pendant toute la durée de son utilisation, chaque épandeur doit être maintenu dans l'état de fonctionnement ayant reçu l'acceptation du maître d'œuvre (ou son délégué pour la tâche) lors du constat de convenance</p> <ul style="list-style-type: none"> • Malaxage <p>Il est réalisé au moyen de malaxeur(s) constitué(s) par : </p> <p>Le nombre de passes doit être au moins de : passes, avec les malaxeurs suivants : </p> <p>Pendant toute la durée de son utilisation, chaque malaxeur doit être maintenu dans l'état de fonctionnement accepté par le maître d'œuvre lors du constat de la convenance des méthodes et moyens</p> <p>Toute technique de traitement n'utilisant ni char-rues ni pulvérisateurs pour malaxer le sol avec le produit de traitement doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre à l'issue d'une démonstration réalisée lors du constat de la convenance des méthodes et moyens</p>	<p>LES ATELIERS DE TRAITEMENT</p> <ul style="list-style-type: none"> • Épandage <p><i>Une valeur du CV ≤ 15 % est acceptable en général, mais des valeurs plus faibles peuvent être exigées pour certains chantiers (gros chantiers pouvant être rigoureusement organisés, matériaux homogènes permettant une minimisation fine de la consommation du produit de traitement...)</i></p> <p><i>Sauf à disposer d'éléments mieux adaptés au chantier, la méthodologie décrite dans le GTS (annexe 6) pourra être prescrite</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Malaxage <p><i>La stipulation d'engins de malaxage d'un type donné doit être justifiée par les particularités du chantier, en particulier lorsqu'il est acquis que l'emploi de pulvérisateurs s'avère pertinent (cas des sols A₃, par exemple)</i></p> <p><i>Les engins de malaxage prescrits doivent être définis par leur morphologie (charrue à disques, à socs, pulvérisateur, etc.) et par leur profondeur d'action maximale</i></p> <p><i>L'intérêt de stipuler un nombre minimal d'engins de malaxage est encore plus discutable, mais peut être justifié, pour des chantiers importants notamment pour une meilleure garantie du respect des délais</i></p> <p><i>Lorsqu'un nombre de passes minimal est stipulé, il doit être associé à un type d'engin de malaxage donné (par exemple, trois passes dans le cas d'une charrue à disques... cf. GTS § I-441)</i></p>

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉUTILISATION EN REMBLAI

Texte	Commentaires
LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS	LE COMPACTAGE DES SOLS TRAITÉS
a. - doit être réalisé conformément aux modalités figurant dans les tableaux du GTR pour chacune des classes de sols concernées	<i>Les stipulations concernant le compactage des sols traités étant identiques à celles des sols non traités, elles peuvent être formulées dans l'article relatif au compactage des matériaux utilisés pour la construction des remblais selon l'une ou l'autre des formulations proposées dans le texte ci-contre</i>
La vérification du respect des modalités d'utilisation des compacteurs est réalisée selon la procédure définie dans le PAQ	<i>Lorsque, dans un marché, les deux propositions a. et b. sont envisagées, les natures de matériaux ou les ouvrages ou parties d'ouvrages où elles s'appliquent respectivement doivent être définis. La stipulation des deux propositions sur un même ouvrage ou partie d'ouvrage est en effet à proscrire</i>
b. - doit permettre d'obtenir, en tout point de la couche compactée, un taux de compactage minimal de 95 % (exprimé par le rapport entre la masse volumique apparente sèche du sol traité et sa masse volumique maximale proctor normal)	<i>La proposition a. est à retenir dans le cas général. Elle impose la connaissance de l'identification (en nature et état) des sols mis en œuvre et des dispositions particulières (contrôlographes étalonnés, jauge d'épaisseur des couches élémentaires, etc.) permettant la vérification des modalités d'utilisation des compacteurs</i>
La vérification de l'obtention du taux de compactage exigé est réalisée selon :	<i>La proposition b. est réservée aux petits chantiers ainsi qu'aux ouvrages exigus, sur lesquels le contrôle de la spécification précédente n'est pas réalisable avec une fiabilité suffisante</i>
a. - la procédure définie dans le PAQ	<i>Sa formulation dans le marché n'est cependant acceptable que si la granularité du sol satisfait les exigences de l'essai proctor et que si l'on dispose, au moment de l'exécution, des moyens (matériel et personnel) suffisants pour en contrôler le respect</i>
b. - la procédure suivante :	<i>La procédure de l'action de vérification de l'obtention du taux de compactage doit normalement être définie dans le PAQ (proposition a.)</i>
	<i>Si, toutefois, le rédacteur du marché souhaite fixer la procédure dans le CCTP (proposition b.), les éléments indicatifs suivants peuvent être proposés :</i>
	<ul style="list-style-type: none"> - les appareils de mesure de la densité en place devront avoir une profondeur d'investigation au moins égale à 80 % de l'épaisseur de la couche mise en œuvre - le contrôle intérieur doit être en mesure de justifier les valeurs des densités de référence proctor normal considérées dans le calcul des taux de compactage affichés - la fréquence des essais de contrôle doit être d'au moins un essai pour 1000 m³ de sol traité mis en remblai
LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT	LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT
Les règles pratiques visant la protection de l'environnement vis-à-vis des missions de poussières de produit de traitement énoncées dans l'annexe 5 du GTS pour les chantiers courants s'appliquent et sont complétées par les dispositions suivantes :	<i>Dans le cas de chantiers à environnement sensible, les règles pratiques indiquées dans l'annexe 5 peuvent être complétées par des dispositions complémentaires telles que :</i>
.....	<ul style="list-style-type: none"> - l'interdiction de traiter entre tel et tel profil ou sinon avec un produit à faible capacité d'envol - l'installation d'un anémomètre-enregistreur à proximité du chantier de traitement - la réalisation d'une protection particulière de la zone de stockage - etc.
.....	

Éléments pour la rédaction des stipulations relatives au traitement des sols pour la réalisation de couches de forme



Les propositions de stipulations proposées ci-après découlent principalement des éléments présentés dans les tableaux C3-II, C3-III et C3-IV du chapitre C3 « Assurance de la Qualité » des couches de forme.

Elles sont présentées selon la manière suivante :

- Dans la **colonne de gauche** figurent les **stipulations proprement dites**.
- Dans la **colonne de droite** et en correspondance de chaque stipulation, figurent **différents commentaires** destinés à guider le rédacteur d'un chantier donné dans le choix et le contenu des stipulations adaptées au chantier qui le concerne.

□ Rédaction 1

Les stipulations présentées dans la rédaction dénommée « Rédaction 1 » concernent le cas où le CCTP impose tous les paramètres définissant le traitement (cadre-type de marché 1 explicité dans le tableau C3-I).

□ Rédactions 2 et 3

Les rédactions dénommées « Rédaction 2 » et « Rédaction 3 » s'appliquent aux cas où les soumissionnaires sont autorisés à présenter une offre leur laissant le choix de certains paramètres du traitement (cf. tableau C3-I : cadre-type de marchés 2 et 3). Elles proposent alors des stipulations complémentaires, qu'il y a lieu d'ajouter à la « Rédaction 1 ».

Ces stipulations complémentaires peuvent figurer dans le CCTP ou plus avantageusement dans le Règlement de consultation (RC), étant donné que le fait de laisser des choix au soumissionnaire revient à autoriser certaines variantes par rapport à la solution de base définie dans le CCTP.

Les stipulations complémentaires particulières au cadre-type de marché 4 décrit dans le tableau C3-I (cas où le soumissionnaire est autorisé à proposer une optimisation de la structure : PST-Couche de forme, voire PST-Couche de forme-Assises) ne sont pas proposées, faute d'expérience, mais, le cas échéant, les éléments donnés dans le tableau C3-III apportent déjà une aide substantielle à leur rédaction.

Les stipulations proposées dans cette annexe s'appliquent dans leur esprit également au traitement des sols destiné à la réalisation de certaines zones particulières de remblai (PST, remblais techniques, etc.). Une adaptation à ces natures d'ouvrage, notamment à partir des indications données dans les tableaux B-VIII et B-IX, est néanmoins nécessaire.

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte	Commentaires
-------	--------------

Rédaction 1

Cette rédaction présente les stipulations à formuler dans un marché de couche de forme en sol traité lorsque le prescripteur décide d'imposer l'ensemble des paramètres qui régissent le traitement

Elle s'applique en particulier aux marchés dont les enjeux techniques, économiques, environnementaux et de programmation justifient de se tenir aux choix ayant prévalu dans la conception de la solution de base

LOCALISATION, NATURE, ÉTAT DES MATÉRIAUX À TRAITER

Les matériaux à réserver pour le traitement sont les matériaux des classes : ; ;

Le mouvement des terres est soumis aux sujétions suivantes :

- Réserve pour traitement des déblais ci-après :
.....
.....

- Mise en dépôt provisoire en vue du traitement pour couche de forme des matériaux des classes ; ; jusqu'à concurrence d'un volume de m³

- La constitution des dépôts provisoires doit prendre en considération les sujétions suivantes :
.....

- L'exécution du traitement mixte doit prendre en considération les sujétions suivantes :
.....

LOCALISATION, NATURE, ÉTAT DES MATÉRIAUX À TRAITER

- Les classes de matériaux sont à définir suivant la classification NF P 11-300 en précisant, si nécessaire, certaines limites (par exemple, sols A₂ dont l'IP est ≤ 20)

- Les sujétions à stipuler sur le mouvement des terres ne doivent pas être systématiques, mais justifiées par le contexte particulier du chantier (recherche d'une optimisation des ressources)

- Lorsque la réserve de gisements particuliers est stipulée, leur localisation doit être dans toute la mesure du possible définie topographiquement par référence aux plans du projet. La réserve de familles particulières de matériaux définies par leur seule identification géotechnique peut également être envisagée dans la mesure où le dossier géotechnique permet une évaluation suffisamment précise des mouvements de terre induits par les sujétions imposées ou si un système adapté de rémunération de ces mouvements de terre a été prévu

- La stipulation de réserve par mise en dépôt provisoire de certains matériaux peut être assortie d'exigences complémentaires telles que la géométrie du dépôt, la nécessité de réaliser un ajustement de l'état hydrique, les modalités de construction et de reprise

Dans le cas de traitement mixte, des exigences particulières peuvent être justifiées telles que la réalisation du prétraitement à la chaux avant constitution du dépôt, le lieu d'exécution du traitement au ciment (sur le dépôt ou à l'emplacement de la couche de forme)

PRODUITS DE TRAITEMENT ET DOSAGES

- Les produits à utiliser pour le traitement de la couche de forme sont :

. nature de la chaux :
. nature du (ou des) liant(s) hydraulique(s) :

- Dans le cas d'un traitement avec un seul produit de traitement :

les dosages à appliquer sont :
. pour les sols de la classe :de%
. pour les sols de la classe :de.....%

PRODUITS DE TRAITEMENT ET DOSAGES

En règle générale, cette stipulation est à formuler dans le chapitre III du CCTP « Caractéristiques-Origines-Destinations des matériaux »

- Les produits de traitement à stipuler doivent, sauf exception, être ceux considérés dans l'étude de traitement (cf. GTS § C1-3.3.)

Les produits normalisés sont à privilégier dans le cas général

- Les valeurs des dosages à stipuler sont celles données par l'étude de traitement ou, à défaut, sont fixées a priori (cf. GTS tab. C1-V)

- Les classes de matériaux sont à définir suivant la classification NF P 11-300

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

- Dans le cas d'un traitement mixte :
 - . le dosage en chaux est fixé par application de la règle suivante :
- Les dosages en liant hydraulique sont :
 - pour les sols de la classe :de%
 - pour les sols de la classe :de.....%

Commentaires

- À défaut d'autres éléments, l'ajustement du dosage en chaux en fonction de l'état hydrique du matériau à traiter s'appuiera sur les éléments du tableau C1-V ou C1-VIII du GTS
- Les valeurs des dosages en liant hydraulique à stipuler sont celles données par l'étude de traitement ou, à défaut, sont fixées a priori (cf. GTS, tab. C1-V)

ARASE DE TERRASSEMENTS

- La portance de l'arase des terrassements, au moment de la mise en œuvre de la couche de forme doit être d'au moins MPa
- Les tolérances de nivellement de l'arase des terrassements sont de \pm ... cm

ARASE DE TERRASSEMENTS

- À défaut d'exigences particulières, on retiendra une valeur de portance minimale de 35 MPa
- À défaut d'exigences particulières, on retiendra une tolérance de \pm 5 cm

STOCKAGE DU (OU DES) PRODUITS DE TRAITEMENT

La capacité de stockage du produit de traitement à installer sur le chantier sera d'au moins tonnes

STOCKAGE DU (OU DES) PRODUITS DE TRAITEMENT

Une capacité de stockage équivalente à la consommation d'une journée moyenne de travail peut être exigée en général. Cette capacité peut toutefois ne pas être imposée dans le CCTP, mais seulement décidée lors de l'établissement du PAQ

FABRICATION DU MÉLANGE

- Le mélange sera fabriqué :
- a. - en place pour les sols des classes :
 - b. - dans une centrale de fabrication pour les sols des classes :

FABRICATION DU MÉLANGE

- En règle générale, le traitement en place n'a pas de raison d'être stipulé
- La stipulation du mode de fabrication du mélange doit être justifiée par les particularités du chantier et les résultats de l'étude géotechnique

FABRICATION DU MÉLANGE EN PLACE

- **Épandage**
 - L'épandeur utilisé doit comporter un doseur du type suivant :
- L'épandeur doit posséder les équipements suivants :
- L'épandeur doit pouvoir épandre en une passe des masses surfaciques comprises entre et kg/m²
- La précision de l'épandeur doit être telle que :
 - . son coefficient de variation soit inférieur à : %
 - . son exactitude soit au moins égale à : %

FABRICATION DU MÉLANGE EN PLACE

- Cet article est sans objet lorsqu'un traitement en centrale est retenu dans la solution soumise à la consultation
- **Épandage**
 - L'exigence minimale est celle d'un doseur volumétrique dont le débit est asservi à la vitesse d'avancement de l'engin
 - Des exigences telles que des dispositifs de pesage et de mesure de distance embarqués, une largeur d'épandage variable ... peuvent être stipulées pour des chantiers particuliers (couche de forme-fondation autoroutière ...), mais, dans le cas général, il est préférable de définir ces dispositifs dans le PAQ
 - Les valeurs maximales et minimales des masses surfaciques à stipuler sont, en général, celles qui correspondent aux dosages minimaux et maximaux déterminés par l'étude de formulation
 - L'exigence minimale à stipuler sur le coefficient de variation de l'épandeur, mesuré selon la méthode proposée dans l'annexe 6 du GTS, est de 10 %
 - L'exigence minimale à stipuler pour l'exactitude de l'épandeur, mesurée selon la méthode proposée dans l'annexe 6 du GTS, est de 5 % de la valeur visée

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR REALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

Commentaires

• Malaxage

Le malaxeur utilisé doit être du type suivant :

.....

L'épaisseur de la couche malaxée, mesurée après compactage, doit être d'au moins cm

Le malaxeur doit posséder les équipements suivants :

.....

La finesse de mouture doit être telle que le D_{95} du mortier (fraction $\leq 400 \mu\text{m}$) du mélange soit inférieur à mm

• Arrosage

- L'eau utilisée pour l'arrosage du mélange doit être conforme à la norme NF P 98-100, Type 1, ou d'une eau telle que définie par la norme NF P 98-100, Type 2, si l'entreprise présente une étude justificative

- Le lieu de prélèvement de l'eau doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre

- Les capacités d'approvisionnement de l'eau et d'arrosage doivent permettre une élévation de la teneur en eau des sols à traiter de points à la cadence de fabrication du mélange prévue

- Le dernier stade de mise en œuvre où l'arrosage du mélange peut encore être réalisé est avant le compactage partiel et si possible entre l'avant-dernière et la dernière passe du malaxeur

- L'arrosage doit être réalisé à l'aide des matériels suivants :

.....

.....

• Malaxage

Cet article est sans objet lorsqu'un traitement en centrale est retenu dans la solution soumise à la consultation

En règle générale, le type de malaxeur à stipuler est un pulvérisateur de sol à arbre horizontal

Si, compte tenu des particularités du chantier, d'autres engins de malaxage en place (rotobèches, charrues, etc.) sont acceptés, il convient de le stipuler et de préciser pour quelles natures de travaux ou parties d'ouvrages ils sont requis

La valeur de l'épaisseur de la couche malaxée à stipuler doit être compatible avec les capacités du malaxeur utilisé. La plupart des pulvérisateurs de sols permettent de malaxer une couche de 30 cm d'épaisseur (mesure après compactage), mais les plus puissants de ces engins atteignent 45 cm

La stipulation de dispositifs particuliers tels que : incorporation d'eau (ou autre liquide) directement dans la chambre de malaxage, pilotage de l'épaisseur malaxée par référence à une valeur de consigne peut être justifiée pour certains chantiers (couche de forme-fondation autoroutière, retraitement d'anciennes chaussées...), mais, dans le cas général, il est préférable de définir ces dispositifs dans le PAQ

La finesse de mouture du mortier à stipuler peut, à défaut d'autres éléments, être fixée par référence aux indications données dans le GTS, tab. C3-II

• Arrosage

Une capacité d'approvisionnement en eau et d'arrosage permettant une élévation de teneur en eau, fonction du chantier, peut éventuellement être imposée mais il est souvent plus judicieux de la fixer dans le PAQ

Compte tenu de la rusticité de la plupart des matériels d'arrosage actuels, la stipulation d'engins d'arrosage particuliers (arrosage par incorporation d'eau dans la chambre de malaxage des pulvérisateurs...) ou à l'aide d'engins classiques équipés de dispositifs spécifiques pour améliorer la précision d'aspersion (rampes latérales déportées, pompes à débit asservi à la vitesse de déplacement...) est souvent justifiée par le niveau de qualité recherché pour le chantier (couche de forme-fondation autoroutière, retraitement de chaussées...), mais, dans le cas général, il est préférable de définir ces dispositifs dans le PAQ

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

- La précision de l'arrosage obtenue avec les engins utilisés doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre

FABRICATION DU MÉLANGE DANS UNE CENTRALE

- La centrale de fabrication du mélange doit être de niveau :
- Le débit de fabrication de la centrale utilisée doit être d'au moins..... tonnes par heure
- La finesse de mouture doit être telle que le D_{95} du mortier (fraction $< 400 \mu\text{m}$) du mélange soit inférieure à mm
- L'eau utilisée pour l'arrosage du mélange doit être conforme à la norme NF P 98-100, Type 1, ou d'une eau telle que définie par la norme NF P 98-100, Type 2, si l'entreprise présente une étude justificative
- Le lieu de prélèvement de l'eau doit avoir reçu l'acceptation du maître d'œuvre

COMPACTAGE

- Les engins de compactage utilisés devront pouvoir compacter, en une seule couche, une épaisseur (considérée après compactage) de matériau traité d'au moins cm
- Le compactage de la couche de forme en matériaux traités doit :
 - a. - être réalisé conformément aux stipulations figurant dans les tableaux du GTR pour chacune des classes de sols concernées
 - b. - permettre d'obtenir, en tout point de la couche compactée, un taux de compactage moyen minimal de 98,5 % et de 96 % en fond de couche. Ces taux de compactage sont exprimés par le rapport entre la masse volumique apparente sèche du sol traité et sa masse volumique maximale proctor normal

Commentaires

La précision de l'arrosage peut être objectivement évaluée à partir de la détermination du coefficient de variation et de l'exactitude de l'arroseuse selon une méthode comparable à celle décrite pour les épandeurs (cf. : annexe 6) et, dans l'état de l'expérience actuelle, les exigences retenues pour l'épandage des produits de traitement peuvent être admises également

FABRICATION DU MÉLANGE DANS UNE CENTRALE

Cet article est sans objet lorsqu'un traitement en place est retenu dans la solution soumise à la consultation

Il convient, en général, de stipuler une centrale de fabrication de niveau 2

La valeur du débit horaire à stipuler doit être établie en cohérence avec le planning, la saison des travaux et les délais de réalisation du chantier

L'exigence minimale de finesse de mouture du mortier à stipuler est de 20 mm, mais des valeurs plus faibles peuvent être exigées si l'étude en a montré la nécessité et la faisabilité

COMPACTAGE

La stipulation d'engins pouvant compacter une épaisseur minimale donnée s'impose lorsque le projet a prévu la réalisation de la couche de forme en une seule couche. Cette épaisseur ne peut, cependant, pas dépasser une valeur de l'ordre de 40 cm qui constitue la limite d'efficacité des compacteurs actuels les plus puissants sur des sols traités

Lorsque le dimensionnement de la couche de forme dépasse cette valeur et donc n'autorise pas sa mise en œuvre en une couche, il y a lieu de minimiser le nombre des couches élémentaires et de stipuler des engins dont l'épaisseur efficace permet de réaliser la couche de forme en deux couches au maximum

Pour un tronçon de couche de forme donnée, le marché ne doit imposer qu'une seule des deux spécifications a. et b. de compactage proposées

La proposition a. est à retenir dans le cas général. Elle impose toutefois une bonne connaissance de l'identification des sols mis en œuvre (notamment de leur état hydrique) et la présence des dispositions particulières (tachygraphes...) permettant la vérification des modalités d'utilisation des compacteurs

La proposition b. est à réserver aux petits chantiers ainsi qu'aux ouvrages exigus sur lesquels le contrôle de la spécification précédente n'est pas réalisable avec une fiabilité suffisante. Sa formulation dans le marché n'est, cependant, acceptable que si la granulométrie du sol satisfait les exigences de l'essai proctor et que si l'on dispose, au moment de l'exécution, des moyens (matériel et personnel) suffisants pour en contrôler le respect

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR REALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

En complément des engins permettant d'obtenir les taux de compactage définis ci-dessus, l'atelier de compactage devra comprendre les engins suivants :

Commentaires

La stipulation d'engins complémentaires (rouleaux à pneus, rouleaux à pieds ...) peut s'imposer sur certains grands chantiers pour réaliser des compactages spécifiques (cf. GTS § C-I-2.5.), mais, dans le cas général, il est préférable de définir ces engins dans le PAQ

RÉGLAGE

- Le réglage final de la plate-forme doit être exécuté par un rabotage de toute la surface de la plate-forme sur une épaisseur minimale de :

.cm pour les sols des classes A₁, A₂ et A₃

. cm pour les sols des classes B

- Ce rabotage doit notamment éliminer toutes les parties de la couche présentant un feuilletage résultant du compactage

- Le réglage final doit être réalisé dans de bonnes conditions de visibilité

- Le matériau raboté ne peut plus être réutilisé dans la construction de la couche de forme

- Les engins à utiliser pour la réalisation du réglage de la plate-forme sont les suivants :

- L'épaisseur finale de la couche de forme doit être de mm

Elle sera mise en œuvre en couche(s) au plus

- Les tolérances de nivellement de la plate-forme sont les suivantes :

RÉGLAGE

La stipulation de l'épaisseur minimale à raboter n'est à stipuler dans le CCTP que si l'on dispose d'une expérience suffisante et/ou d'études spécifiques (un chantier expérimental, par exemple)

En général, il est préférable de définir cette valeur dans la procédure de réglage au terme de la phase de préparation du chantier (sur la base de l'épreuve de convenance)

En général, les ateliers de réglage sont décrits dans la procédure de réglage, mais la stipulation, dans le CCTP, d'engins de réglage particuliers (niveleuses ou autogrades guidés sur fil laser, GPS ...) peut s'imposer sur de grands chantiers, elle doit, cependant, être justifiée par les enjeux techniques du chantier

La valeur de l'épaisseur de la couche de forme et le nombre de couches élémentaires de mise en œuvre à stipuler sont ceux pris en compte dans le dimensionnement de la structure

Les valeurs à stipuler dépendent de la granularité du matériau traité. La tolérance habituelle est de ± 3 cm. Dans le cas de couche de forme autoroutière en sols fins traités, des tolérances de ± 2 cm peuvent normalement être respectées

CLOUTAGE

Les couches de forme traitées constituées à partir des matériaux des classes ; ; devront faire l'objet d'un cloutage à l'aide de gravillons concassés dont les caractéristiques sont les suivantes :

- granularité :/.....

- coefficient Los Angelès :

- coefficient Micro-Deval humide :

répandus à raison de à kg/m² et enchassés par compactage dans le sol traité sur environ le tiers de leur diamètre

CLOUTAGE

Les classes de sols qui exigent généralement un cloutage sont les classes A et C_A (cf. GTR et GTS § C-II-2.8)

La granularité généralement retenue est 10/20 mm, mais une granularité plus grossière (20/31,5 mm) peut être préférable sur les sols traités les plus fins (classes A₂ et A₃)

À défaut de valeurs mieux adaptées au chantier, on adoptera :

- coefficient Los Angelès ≤ 25

- coefficient Micro-Deval humide ≤ 25

- quantité à épandre 5 à 7 kg/m²

PROTECTION SUPERFICIELLE

• Nature

La nature de la protection superficielle à appliquer sur la couche de forme est la suivante :

PROTECTION SUPERFICIELLE

• Nature

La nature de la protection superficielle doit être stipulée qualitativement et quantitativement en fonction des rôles qui lui sont dévolus pour le chantier considéré

Les éléments permettant de définir la protection superficielle sont indiqués dans le GTS (cf. § C-II-2.9)

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte	Commentaires
<p>• Produits concernés</p> <p>- Les caractéristiques des produits utilisés pour la réalisation de la protection sont les suivantes :</p> <p>- Les quantités respectives de chaque constituant sont les suivantes :</p>	<p>• Produits concernés</p> <p><i>En règle générale, cette stipulation est à formuler dans le chapitre III du CCTP « Caractéristiques-Origines-Destinations des matériaux »</i></p> <p><i>À défaut d'éléments plus pertinents pour le chantier, on retiendra les valeurs proposées dans le GTS (cf. § C-II-2.9)</i></p> <p><i>À défaut de valeurs plus pertinentes pour le chantier, on retiendra les valeurs proposées dans le GTS (cf. § C-II-2.9).</i></p>
<p>ORGANISATION DE CHANTIER</p> <p>Le chantier de traitement de la couche de forme doit être organisé de manière à ce que les opérations suivantes :</p> <p>..... soient exécutées dans le délai de maniabilité du mélange</p>	<p>ORGANISATION DE CHANTIER</p> <p><i>Les opérations à exécuter dans le délai de maniabilité du mélange dépendent des options retenues pour la réalisation du chantier (traitement en centrale, traitement en place avec ou sans mouvement de terres ...)</i></p> <p><i>Pour établir les stipulations correspondant au cas de chantier concerné, se référer à la figure C-II-2.b/ du GTS</i></p>
<p>CIRCULATION SUR LA COUCHE DE FORME</p> <p>La circulation de chantier sur la couche de forme est interdite durant les jours suivant sa mise en œuvre</p>	<p>CIRCULATION SUR LA COUCHE DE FORME</p> <p><i>En général, on retiendra le temps au bout duquel la R_c du sol traité atteint une valeur ≥ 1 MPa (déduit de l'étude de formulation ou mesuré sur des éprouvettes moulées au moment de la fabrication du mélange)</i></p> <p><i>À défaut et dans le cas des ciments, on pourra retenir une valeur forfaitaire de 10 jours</i></p>
<p>PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT</p> <p>Les règles pratiques concernant la protection de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement énoncées dans l'annexe 5 du GTS pour les chantiers courants s'appliquent et sont complétées par les dispositions suivantes :</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>pour les zones du chantier définies entre les profils et</p> <p>qui doivent être considérées comme des zones à environnement sensible</p>	<p>PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT</p> <p><i>Dans le cas de chantiers à environnement sensible, les règles pratiques indiquées dans l'annexe 5 peuvent être complétées par des dispositions complémentaires telles que :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - l'interdiction de traiter entre tel et tel profil ou sinon avec un produit à faible capacité d'envol - l'installation d'un anémomètre-enregistreur à proximité du chantier de traitement - la réalisation d'une protection particulière de la zone de stockage - etc.

Rédaction 2

Cette rédaction est à retenir lorsque le DCE autorise le soumissionnaire à proposer :

- un (ou des) produit(s) de traitement
- le (ou les) dosage(s) à appliquer
- un mode de fabrication du mélange

différents de ceux considérés dans la solution de base tel que cela est envisagé dans le cadre-type de marché 2 décrit dans le GTS (§ C-III-1.2)

Les stipulations formulées dans cette rédaction s'ajoutent alors aux stipulations définies dans la rédaction 1

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

CLASSE MÉCANIQUE DU MATÉRIAU TRAITÉ

- Si l'entreprise utilise pour réaliser la couche de forme en sol traité :

- . un (ou des) produit(s) de traitement
- . des dosages
- . un mode de fabrication du mélange

différents de ceux considérés dans la solution de base, le matériau traité devra être au minimum de classe mécanique

Pour garantir l'obtention de la classe mécanique imposée, l'entreprise devra présenter :

a. - des références aisément vérifiables obtenues sur des chantiers comparables

b. - une étude de traitement, d'un niveau au moins égal à celui ayant conduit à la solution de base, et, dans tous les cas, au moins de niveau 1

- La solution de base étant établie dans l'hypothèse d'un traitement en centrale, l'entreprise ne peut réaliser un traitement en place, qu'à la condition d'avoir démontré la possibilité d'obtenir par ce mode de fabrication une qualité du mélange comparable à celle obtenue en centrale

Commentaires

CLASSE MÉCANIQUE DU MATÉRIAU TRAITÉ

La classe mécanique à stipuler est au minimum celle considérée dans la solution de base

Pour un chantier donné, ne retenir qu'une seule des deux rédactions a. et b. proposées

La rédaction a. est à réserver aux petits chantiers

La rédaction b. s'applique aux chantiers importants et à tous les chantiers pour lesquels une plate-forme de classe 3 ou plus est recherchée

Cette stipulation est sans objet, si la solution de base n'a pas imposé le mode de fabrication du mélange en centrale

Cette démonstration est à faire en phase de préparation du chantier dans le cadre des actions visant à démontrer la convenance des méthodes et des moyens

PERFORMANCES MÉCANIQUES DE LA PLATE-FORME

La déformabilité de la plate-forme devra présenter, après jours, une déflexion, sous un essieu de 130 kN, inférieure à :

PERFORMANCES MÉCANIQUES DE LA PLATE-FORME

L'âge au bout duquel la valeur de la déformabilité de la plate-forme peut être exigée dépend de la nature du produit de traitement utilisé. À défaut d'autres éléments, on retiendra un âge de 28 j pour les traitements avec de la chaux ou avec des ciments. Dans le cas de traitement avec des LSR, cet âge devra être établi spécifiquement pour le produit concerné

Les valeurs de la déformabilité à stipuler peuvent, à défaut d'autres éléments, être celles proposées dans le tableau ci-dessous :

Classe de plate-forme visée	Déflexion maximale sous un essieu de 130 kN (mm)	
	Traitement à la chaux seule	Traitement avec un liant hydraulique (éventuellement associé à la chaux)
PF ₂	1,2	0,8
PF ₃	0,8	0,6
PF ₄	-	0,5

TRAITEMENT DES SOLS TROP HUMIDES POUR RÉALISATION DE COUCHES DE FORME

Texte

Commentaires

Rédaction 3

Cette rédaction est à retenir lorsque le DCE autorise le soumissionnaire à proposer :

- un (ou des) produit(s) de traitement
- un (ou des) dosage(s)
- un mode de fabrication du mélange
- un (ou des) matériau(x) à traiter
- une épaisseur de couche de forme

différents de ceux considérés dans la solution de base tel que cela est envisagé dans le cadre-type de marche 3 décrit dans le GTS (§ C-III-1.2)

Les stipulations formulées dans cette rédaction s'ajoutent alors aux stipulations définies dans les rédactions 1 et 2

CLASSE DE LA PLATE-FORME

- Si l'entreprise utilise pour réaliser la couche de forme en soi traité :

- un (ou des) matériau(x)
- un (ou des) produit(s) de traitement
- des dosages
- un procédé de fabrication du mélange
- une épaisseur de couche de forme

différents de ceux considérés dans la solution de base, la plate-forme support de chaussée ainsi réalisée devra au moins être de classe

- Pour justifier l'obtention de la classe de plate-forme stipulée, le soumissionnaire devra présenter :

- une étude de reconnaissance des gisements qu'elle prévoit d'utiliser
- une étude de traitement au moins de niveau 2

CLASSE DE LA PLATE-FORME

La classe de plate-forme à stipuler est au minimum celle considérée dans la solution de base

À défaut d'autres éléments, il pourra être stipulé que le contenu de l'étude de reconnaissance des gisements devra être conforme aux consignes préconisées dans le GTS, § C-I-1

Il s'agit du niveau d'étude tel que défini dans le GTS, § C-I-2.3.2



Abréviations, symboles, définitions

Les abréviations, sigles, symboles cités dans le présent document sont explicités ci-après.

AR	Arase des terrassements (c'est la plate-forme livrée au terme des travaux de terrassements et sur laquelle sera mise en œuvre, si nécessaire, une couche de forme)
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières (c'est le document contractuel qui définit, pour le projet particulier considéré, l'ensemble des stipulations techniques nécessaires au respect de la qualité requise recherchée par le maître d'œuvre)
CFTR	Comité français pour les techniques routières
CU	Coefficient d'uniformité granulaire d'un sol (il exprime le rapport D_{60} / D_{10} du sol) exprimé en %
DCE	Dossier de consultation des entreprises (c'est l'ensemble des pièces envoyées aux entreprises en vue de l'établissement de leurs offres)
D_{max}	Diamètre des plus gros éléments présents dans un sol (il est apprécié visuellement en général) exprimé en mm
D_x	Dimension de la maille du tamis laissant passer x % d'un échantillon de sol ou de granulat exprimée en mm
E_t	Module de traction exprimé en MPa
F_R	Coefficient de fragmentabilité exprimé en %
GTR	Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme
GTS	Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
I_{CBR} (immersion)	Indice portant CBR après quatre jours d'immersion (dans le GTS, la valeur de I_{CBR} immersion considérée est la résistance au poinçonnement mesurée sur une éprouvette de sol confectionnée selon les modalités de l'essai Proctor Normal et placée en immersion durant quatre jours) exprimé en %
IPI	Indice portant immédiat (dans le GTS, la valeur de l'IPI considérée est la résistance au poinçonnement d'une éprouvette de sol mesurée immédiatement après sa confection selon les modalités de l'essai Proctor Normal) exprimé en %
I_c	Indice de consistance d'un sol (il traduit la position relative de la W_n d'un sol par rapport à ses limites d'Atterberg et s'exprime par la relation $I_c = W_L - W_n / W_L - W_P$) sans unité
I_p	Indice de plasticité d'un sol (il s'exprime par la différence entre la w_L et la w_P du sol considéré (sa valeur est d'autant plus grande que le sol est argileux) exprimé en % de teneur en eau

LA	Coefficient Los Angelès exprimé en %
LSR	Liants spéciaux à usage routier (cette appellation est appelée à devenir LHR : liants hydrauliques routiers)
PAQ	Plan d'assurance de la qualité
PF	Plate-forme support de chaussée (c'est la plate-forme sur laquelle est mise en œuvre la première couche de chaussée ; sa classe, définie à partir du module à long terme du matériau qui la constitue, est une des données initiales du dimensionnement de la structure de chaussée)
PST	Partie supérieure des terrassements (c'est l'épaisseur de remblai ou du terrain naturel, au maximum 1 m en dessous de l'AR, qui est concernée par le dimensionnement de la structure de chaussée)
RC	Réglement de consultation. Il s'agit de la pièce du contrat qui récapitule les sujétions particulières du marché (autres que celles figurant dans le CCTP)
R_c	Résistance en compression simple exprimée en MPa
R_t	Résistance en traction directe exprimée en MPa
R_{cd}	Résistance en compression diamétrale exprimée en MPa
$\rho_{d_{opt}}$	Masse volumique apparente sèche maximale Proctor Normal (c'est la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche mesurée lorsqu'on compacte un sol à l'énergie Proctor Normal, elle est obtenue lorsque la teneur en eau du sol est égale à sa w_{OPN}) exprimée en t/m^3
SDQ	Schéma directeur de la qualité
SOPAQ	Schéma organisationnel du plan d'assurance de la qualité (c'est un document joint à l'offre d'une entreprise. Il indique les lignes générales de la démarche d'assurance de la qualité que l'entreprise prévoit d'appliquer ; doivent y figurer en particulier les réponses au questionnaire éventuel présenté dans le DCE concernant les méthodes et les moyens que l'entreprise appliquera pour réaliser tout ou partie des prestations commandées)
V_{ab}	Valeur au bleu de méthylène d'un sol (elle s'exprime par la masse de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur 100 g de sol ; sa valeur est d'autant plus grande que le sol est argileux) exprimée en g de bleu pour 100 g de sol
w_n (ou w_{nat})	Teneur en eau naturelle du sol (supposée être celle qu'il possède dans son gisement) exprimée en %
w_{opt}	Teneur en eau Optimum Proctor Normal (c'est la teneur en eau permettant d'obtenir la $\rho_{d_{OPN}}$ lorsqu'on compacte le sol à l'énergie Proctor Normal) exprimée en %

Réaliser un recensement exhaustif de la bibliographie relative au traitement des sols avec de la chaux ou des liants hydrauliques est difficilement envisageable tant la littérature a produit de documents dans ce domaine. Il est, par ailleurs, probable que cela ne présenterait qu'un intérêt limité car les idées, les pratiques, la normalisation ont considérablement évolué au cours des quatre décennies durant lesquelles la technique a progressivement acquis son niveau de développement actuel.

On se limitera donc ici à rappeler :

■ la liste des normes appelées dans les différentes parties du présent guide technique	226
■ les textes réglementaires relatifs à l'assurance de la qualité des ouvrages routiers	233
■ Les principaux documents étrangers à caractère général et méthodologique sur le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques	234
■ Les documents méthodologiques français en relation avec le GTS	235
■ Les publications référencées dans le GTS : - publications de l'AIPCR, - articles de langue française ayant marqué des avancées notoires de la technique (Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Revue générale des routes et des aérodromes, Revue Terrassements et carrières, etc.)	237

Normes relatives aux liants hydrauliques

P 15-101-1	Mai 1993
Ciments - Composition, spécifications et critères de conformité - Partie 1 : Ciments courants	
NF P 15-300	Décembre 1981
Liants hydrauliques - Vérification de la qualité des livraisons - Emballage et marquage	
NF P 15-301	Juin 1994
Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité	
NF P 15-431	Février 1994
Liants hydrauliques - Techniques des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal	
NF P 15-433	Février 1994
Méthode d'essai des ciments - Détermination du retrait et du gonflement	
NF P 15-436	Février 1994
Liants - Mesure de la chaleur d'hydratation par calorimètre semi-adiabatique (dite Méthode du calorimètre de LANGAVANT)	
P 15-466	Août 1983
Liants - Reconnaissance rapide des ciments à la livraison par rapport à un échantillon de référence	
P 15-467	Mars 1987
Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X	
P 15-474	Février 1994
Méthode d'essais des ciments - Partie 4 : Détermination quantitative des constituants	
P 15-108	(En projet au 1er janvier 2000)
Liants hydrauliques routiers - Composition - Spécifications	

Normes relatives aux chaux aériennes

NF P 98-101

Juillet 1991

Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique
pour sols et routes - Spécifications

NF P 98-102

Juillet 1991

Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique
pour sols et routes - Essai de réactivité de la chaux
vive à l'eau

NF P 15-461

Méthode d'essais des chaux aériennes -
Détermination de la teneur en chaux libre
(Méthode LEDUC)

NF P 18-560

Méthode d'essais des chaux aériennes -
Détermination des passants à 0,08 mm, 0,2 mm
et 2 mm

NF U 44-145

Matières fertilisantes - Dosage du magnésium
par spectrométrie (absorbtion atomique)

NF U 44-146

Matières fertilisantes -
Dosage du magnésium par complexométrie à EDTA

NF U 44-147

Matières fertilisantes -
Dosage du magnésium par complexométrie à EGTA

NF U 44-148

Matières fertilisantes -
Dosage du calcium par spectrométrie
(absorbtion atomique)

Normes relatives à l'eau pour traitement des sols

NF P 98-100

Novembre 1991

Assises de chaussées - Eaux pour assises -
Classification

Normes relatives aux modalités de confection des éprouvettes

NF P 98-230-1

Avril 1992

Essais relatifs aux chaussées -
Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 1 : Fabrication des éprouvettes par vibro-compression

NF P 98-230-2

Août 1994

Essais relatifs aux chaussées -
Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 2 : Fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique

NF P 98-230-3

Décembre 1993

Essais relatifs aux chaussées -
Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités - Partie 3 : Fabrication en laboratoire de mélanges de graves ou de sables pour la confection d'éprouvettes

Normes relatives aux essais sur éprouvettes

NF P 98-231-5

Avril 1997

Essais relatifs aux chaussées -
Comportement au compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés -
Partie 5 : Détermination par auscultation dynamique du délai de maniabilité des graves traitées aux liants hydrauliques

NF P 98-231-6

Avril 1997

Essais relatifs aux chaussées -
Comportement au compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés -
Partie 6 : Détermination par compactage différé du délai de maniabilité des graves et sables traités aux liants hydrauliques

NF P 98-232-1

Novembre 1991

Essais relatifs aux chaussées -
Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques -
Partie 1 : Essai de compression simple sur graves

NF P 98-232-2

Septembre 1992

Essais relatifs aux chaussées -
Détermination des caractéristiques mécaniques
des matériaux traités aux liants hydrauliques -
Partie 2 : Essai de traction directe sur sables
et graves

NF P 98-232-3

Novembre 1997

Essais relatifs aux chaussées -
Détermination des caractéristiques mécaniques
des matériaux traités aux liants hydrauliques -
Partie 3 : Essai de compression diamétrale sur sables
et sols fins

NF P 98-234-2

Février 1996

Essais relatifs aux chaussées -
Comportement au gel - Partie 2 : Essai
de gonflement au gel des sols et matériaux
granulaires traités ou non de $D_{\max} = 20 \text{ mm}$

Normes relatives à l'identification des sols

NF P 11-300

Septembre 1992

Exécution des terrassements - Classification
des matériaux utilisables dans la construction des
remblais et des couches de forme d'infrastructures
routières

NF P 11-301

Décembre 1984

Exécution des terrassements - Terminologie

XP P 94-010

Décembre 1996

Sols : Reconnaissance et essais -
Glossaire géotechnique

NF P 94-049 -1

Février 1996

Sols : Reconnaissance et essais -
Détermination de la teneur en eau pondérale
des matériaux - Partie 1 : Méthode de la
dessiccation au four à micro-ondes

NF P 94-049-2

Février 1996

Sols : Reconnaissance et essais -
Détermination de la teneur en eau pondérale
des matériaux - Partie 2 : Méthode à la plaque
chauffante ou panneaux rayonnants

NF P 94-050	Septembre 1995
Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols - Méthode par étuvage	
NF P 94-051	Mars 1993
Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'ATTERBERG - Limite de liquidité à la coupelle. Limite de plasticité au rouleau	
NF P 94-055	Décembre 1993
Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique	
NF P 94-056	Mars 1996
Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage	
NF P 94-057	Mai 1992
Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrie des sols - Méthode par sédimentation	
NF P 94-064	Novembre 1993
Sols : Reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique	
NF P 94-066	Décembre 1992
Sols : Reconnaissance et essais - Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux	
XP P 18-579	Décembre 1990
Granulats - Essai d'abrasivité et de broyabilité	
NF P 94-068	Octobre 1998
Sols : Reconnaissance et essais - Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache	
NF P 94-078	Mai 1997
Sols : Reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion - Indice CBR Immédiat - Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR	

NF P 94-093

Octobre 1999

Sols : Reconnaissance et essais -
Détermination des références de compactage
d'un matériau - Essai PROCTOR normal -
Essai PROCTOR modifié

NF P 94-100

Août 1999

Sols : Reconnaissance et essais - Matériaux traités
à la chaux et/ou aux liants hydrauliques -
Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau
au traitement

Normes relatives aux enduits superficiels

NF P 98-275-1

Septembre 1992

Essais relatifs aux chaussées - Détermination
du dosage en liant répandu - Partie 1 : Essai *in situ*
de dosage moyen et de régularité transversale

NF P 98-276-1

Janvier 1992

Essais relatifs aux chaussées - Mesure du dosage
en granulats d'un enduit superficiel -
Partie 1 : Essai à la boîte doseuse

NF P 98-276-2

Juin 1994

Essais relatifs aux chaussées - Mesure du dosage
en granulats d'un enduit superficiel -
Partie 2 : Détermination de la régularité transversale

XP P 98-277-1

Janvier 1997

Essais relatifs aux chaussées -
Caractéristiques des enduits superficiels d'usure -
Partie 1 : Mesure visuelle des défauts d'aspect

Normes relatives aux matériels

NF P 98-701

Mai 1993

Matériels pour la construction et l'entretien des routes
- Centrales de traitement des matériaux -
Terminologie et performances

NF P 98-711

Août 1993

Matériels pour la construction et l'entretien des routes
- Traitement en place ou retraitement : matériels
de préparation des sols et de stockage des liants
pulvérulents - Terminologie

NF P 98-712

Août 1993

Matériels pour la construction et l'entretien des routes
- Traitement en place ou retraitement : épandeurs
de liants pulvérulents et malaxeurs de sols en place -
Terminologie

NF P 98-730

Septembre 1992

Matériels de construction et d'entretien des routes -
Centrale de fabrication du béton de ciment -
Définition des types de centrales et essais
pour la vérification des réglages

NF P 98-744-1

Décembre 1993

Matériels de construction et d'entretien des routes -
Calibrage et vérification des réglages sur chantier
des doseurs continus des centrales de production
des matériaux - Partie 1 : Densimètre de bande
pour courroie transporteuse

NF P 98-744-2

Octobre 1996

Matériels de construction et d'entretien et des routes -
Calibrage et vérification des réglages sur chantier,
des doseurs continus des centrales de production
des matériaux - Partie 2 : Doseur pondéral
à granulats

NF P 98-744-3

Octobre 1996

Matériels de construction et d'entretien et des routes -
Calibrage et vérification des réglages sur chantier,
des doseurs continus des centrales de production
des matériaux - Partie 3 : Doseur volumétrique
à granulats

NF P 98-744-4

Octobre 1996

Matériels de construction et d'entretien des routes -
Calibrage et vérification des réglages sur chantier,
des doseurs continus des centrales de production de
matériaux - Partie 4 : Doseur pondéral à pulvérulent -
Essai par prélèvement sur courroie

NF P 98-744-5

Octobre 1996

Matériels de construction et d'entretien des routes -
Calibrage et vérification des réglages sur chantier,
des doseurs continus des centrales de production de
matériaux - Partie 5 : Doseur pondéral à pulvérulent -
Essai par pesée matière

XP P 98-772

Mars 1996

Matériels de construction et d'entretien des routes -
Module d'acquisition de données pour les centrales
de fabrication des mélanges granulaires -
Description et spécifications fonctionnelles -
Module pour la fabrication en continu

Recommandation CCM 2-81 du 27 mars 1981

Bulletin officiel du 27 mars 1981

Guide technique relatif à l'obtention et au contrôle de la qualité des matériaux et des produits

Recommandation CCM B 2-86 du 28 mai 1986

Bulletin officiel du 3 novembre 1986

Obtention et assurance de la qualité dans les marchés publics

Recommandation T 1-87 du 15 octobre 1987

Bulletin officiel du 29 janvier 1988

L'assurance et la gestion de la qualité lors de la passation et de l'exécution de marchés de travaux

Recommandation T 1-89 du 6 décembre 1989

Bulletin officiel du 27 mars 1990

Établissement du schéma directeur de la qualité (SDQ) -
Recommandation aux maîtres d'ouvrage publics du bâtiment

Circulaire du 22 décembre 1992

Direction des routes - Service d'études techniques des routes et autoroutes

La qualité de la route

- SHERWOOD P.T. (1992), *Stabilised capping layers using either lime, or cement, or lime and cement*, Transport Research Laboratory, Contractor report **151/1992**, Old Wokingham Road, Crowthorn, Berkshire (UK).
- POSPISIL F. (1962), *Hlinité a cementové stabilizce*, Praha, Statinakladatelsvitechnické literatury (CZ).
- LITTLE Dallas N., *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*, Sponsored by the National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing Company - Dubuque Iowa (USA).
- (1987), *Lime Stabilization : Reactions, Properties, Design and Construction 1987*, State of the art report **5**, Transportation Research Board, National Research Council Washington D.C. (USA).
- CHADDOCK B.C.J., ATKINSON V.M. (1997), *Stabilized sub-bases in road foundations : structural assessment and benefits*, TRL Report **248/1997**, Transport Research Laboratory, Old Wokingham Road, Crowthorn, Berkshire (UK).
- (1991), *Sol Stabilization 1991*, Transportation Research Record **1295**, Transportation Research Board, National Research Council Washington D.C. (USA).
- *Stabilisation - Stabilisation à la chaux aérienne - Stabilisation aux liants hydrauliques*, Normes Suisses : **SN 640 500 a** ; **SN 640 503 a** ; **SN 640 509 a**, Union des professionnels de la route, Seefeldstrasse 9 8008 Zurich (CH).
- *TP BF-Stb Teil B 11.5 Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat*, 1991, Herausgeber : Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Postfach 501362, 50973 Köln (D).
- *Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln*, 1997, Herausgeber : Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Postfach 501362, 50973 Köln (D).
- VOSTEEN B., Die Behandlung von Böden mit Bindemitteln in der Bundesrepublik Deutschland : Ein Rückblick, *Strasse und Autobahn*, **6/98** et **4/99**.
- BRANDL H., Weiterentwicklungen des mixed in place-verfahrens für hydraulisch gebundene Tragschichten, *Strasse und Autobahn*, **8/98**.

Recommandations, notes d'information, guides techniques

- (1974), *Engazonnement de l'emprise routière*, Note d'information technique, LCPC, octobre, Paris.
- (1975), *Gel et dégel des chaussées*, Note d'information technique, LCPC, janvier, Paris.
- (1982), *Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes*, Note d'information technique, LCPC, Paris.
- (1986), *Météorologie et terrassements - Recommandation*, SETRA-LCPC, Paris.
- (1990), *Traitement des sols à la chaux et/ou aux ciments - Présentation synthétique des aspects techniques et économiques*, Note d'information, **59**, SETRA, juillet, Bagneux. ✕
- (1992), *Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicules 1 et 2.*, SETRA-LCPC, Paris.
- (1994), *Guide technique : Conception et dimensionnement des structures de chaussées*, SETRA-LCPC, Paris.
- ✕ • (1995), *Guide technique : Enduits superficiels d'usure*, SETRA-LCPC, Paris.
- ✕ • (1998), *Catalogue des structures-types de chaussées neuves*, SETRA-LCPC, Paris.
- (1998), *Assises de chaussées. Guide d'application des normes pour le réseau routier national*, SETRA-LCPC, Paris.
- (1999), *Guide technique : Organisation de l'assurance de la qualité dans les travaux de terrassement*, SETRA-LCPC, Paris.
- (À paraître), *Compactage des matériaux de remblai et de couches de forme - Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais*, Note d'information, SETRA, Bagneux.

Avis techniques (en cours de validité au 1er janvier 1997)

■ Relatifs aux matériels de traitement

- *Épandeurs* : Arc 700 ; Arc Dosage ; Elde 15 . Avis techniques **44**, **45** et **52**.
- *Pulvérisateurs* : RA.CO 250 ; Arc Dosage 2. Avis techniques **50 bis** et **77**.
- *Fraiseuses* : RA.CO 250. Avis techniques **51 bis**.

■ Relatifs aux LSR

- LH 38 (Chaux et ciments de Saint-Hilaire) ;
LSC (Ciments Origny) ;
ARC DANNES (Ciments Origny) ;
ROC- Craie (Ciments Origny) ;
ROLAC 124 (Ciments Lafarge) ;
PRV Type A (Ciments Vicat) ;
Avis techniques **41, 65, 73, 74, 75** et **78**.
- Comité français pour les techniques routières, SETRA, Service des publications,
46 avenue Aristide Briand, 92220 Bagneux.

Logiciels

- *ALIZÉ*. Logiciel de calcul des déflexions de surface, des contraintes et des déformations des structures de chaussées, LCPC, Paris.
- *ECOROUTE 4*. Logiciel pour le dimensionnement des chaussées, Presses de l'ENPC, Paris.

Vidéo-cassettes

■ Série « Terrassements »

- **1** : *L'aspect « Terrassement » dans les études routières.*
- **2** : *Les travaux de terrassement.*
- **3** : *Les essais d'identification des sols.*

Publications de l'AIPCR (*)

- [1] *Le traitement des sols à la chaux, aux liants hydrauliques et pouzzolaniques*, Rapport du Comité technique 12 « Terrassements-Drainage-Couches de forme », XIXe Congrès mondial de la route, Marrakech, 1991.
- [2] *Matériels et techniques d'exécution spécifiques aux travaux de traitement des sols*, Publication du Comité technique 12 « Terrassements-Drainage-Couches de forme », Juillet 1997.
- [3] SCHAEFFNER M., MOREL G., VALEUX J.-C., *Interêt économique et maîtrise de la qualité de la technique du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques*, XIXe Congrès mondial de la route, Marrakech, 1991 (communications des Comités techniques).
- [4] MAURICE J.-P., BOURNIQUE A.-G., KERGOET M., *Pollution éolienne et stabilisation des sols*, XIXe Congrès mondial de la route, Marrakech, 1991 (Communications des Comités techniques).

Publications du LCPC (**)

- [5] VIVIER M., ANDRIEUX P., LEPLAT J. (1968), Essais de traitement des limons à la chaux vive dans le département du Nord, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 29, janvier-février.
- [6] LEROUX A. (1969), Traitement des sols argileux par la chaux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 40, septembre-octobre.
- [7] SCHAEFFNER M., PHILIPPE A. (1970), Abaissement de la teneur en eau d'un sol par addition de chaux vive, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 49, novembre-décembre.
- [8] De RAGUENEL A., PUIG J., CORBIN A., GESTIN G. (1973), Bilan du traitement des limons à la chaux et à la chaux et au ciment en Normandie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 67, septembre-octobre.
- [9] SCHAEFFNER M., CAUSERO L. (1974), Utilisation des marnes du Keuper en terrassement. Chantier expérimental de traitement à la chaux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 71, mai-juin.
- [10] De RAGUENEL A., PUIATTI D., GESTIN D. (1976), Constatations sur les couches de forme de l'autoroute A13, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 85, septembre-octobre.

(*) La Grande Arche, paroi Nord, niveau 8, F-92055 PARIS LA DÉFENSE CEDEX 04.

(**) 58 boulevard Lefebvre, F-75732 PARIS CEDEX 15.

- [11] ESTEOULE J., PERRET P. (1979), Le traitement des sols fins à la chaux. Étude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **99**, janvier-février.
- [12] BIMBARD J. (1982), Traitement de surface pour imperméabilisation des sols traités, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **119**, mai-juin.
- [13] BOUTONNET M., LIVET J. (1984), Influence du traitement des limons sur leur comportement au gel, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **133**, septembre-octobre.
- [14] NGUYEN DAC CHI, MULDER J. (1984), Comportement en fatigue des sols fins traités à la chaux et au ciment *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **133**, septembre-octobre.
- [15] MOREL G. (1984), Étude en laboratoire des sols fins traités à la chaux et au ciment, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **133**, septembre-octobre.
- [16] Du MESNIL-ADELÉE M. (1984), Comportement de structures de chaussées en limon traité à la chaux et au ciment. Chantiers expérimentaux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **134**, novembre-décembre.
- [17] RIGOT A. (1984), Fabrication et mise en œuvre du limon traité à la chaux et au ciment. Essais sur chantier expérimental, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **134**, novembre-décembre.
- [18] HOLEF J. (1995), Techniques particulières de terrassements pour la craie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **195**, janvier-février.
- [19] HAVARD H., LAVIRON F., PUECH J.-P., MAGNAN J.-P., RAT M. (1995), Organisation de la reconnaissance géotechnique des tracés routiers, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **195**, janvier-février.
- [20] SCHAEFFNER M., VALEUX J.-C. (1998), Émissions de poussières de chaux et/ou de liants hydrauliques sur les chantiers de traitement de sols et de retraitement de chaussées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **198**, juillet-août.
- [21] LEFORT M., MOREL G., SCHAEFFNER M., VALEUX J.-C. (1995), Traitement des sols en place - Retraitement des anciennes chaussées : Les matériels d'épandage et de malaxage, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial XVIII, Matériels**, mai.
- [22] NGUYEN DAC CHI, DERXK F. (1997), Méthodes de mesure des caractéristiques rhéologiques d'un matériau au moyen de la compression diamétrale - Application aux matériaux routiers, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **207**, janvier-février.
- [23] LEFORT M. (1997), Le point sur le retraitement en place des assises de chaussées, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **212**, novembre-décembre.
- [24] LEROUX A., ORSETTI S., Dégradations des ouvrages liées à l'instabilité des minéraux : les réactions sulfatiques, et HAVARD H., Effet des sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* (à paraître).

Publications de la revue Terrassement et carrières (*)

- [25] Traitement des limons à la centrale à béton, *Terrassement et carrières*, juillet 1993.
- [26] Chantier de l'autoroute A5 : 23 km traités au LSC, *Terrassement et carrières*, janvier 1993.
- [27] Bouleversement sur le marché des stabilisateurs-malaxeurs, *Terrassement et carrières*, avril 1994.
- [28] Marché des épandeurs de pulvérulents : deux produits majeurs, *Terrassement et carrières*, juillet 1994.
- [29] La stabilisation des matériaux locaux en centrale, *Terrassement et carrières*, octobre 1994.
- [30] Les épandeurs s'adaptent, *Terrassement et carrières*, janvier 1995.
- [31] Autoroute A29 - Traitement de choc, *Terrassement et carrières*, octobre 1996.

Publications de la Revue générale des routes et des aérodromes (**)

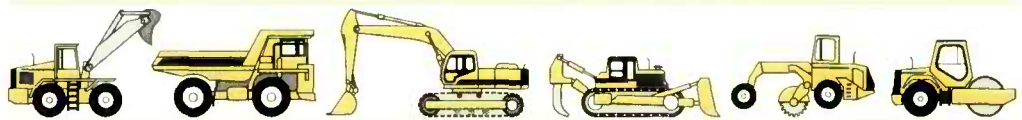
- [32] BARTHELEMY Y., CHABERT M. (1982), Innovations technologiques dans l'utilisation et le traitement des graves argileuses glaciaires de l'autoroute A42, *Revue générale des routes et des aérodromes*, **583**, février.
- [33] SCHAEFFNER M., PUIATTI D. (1984), Le traitement des sols en place. Synthèse de l'expérience française - Possibilités de transfert dans les pays en développement, *Revue générale des routes et des aérodromes*, **614**, décembre.
- [34] GUENOUN A., MILLOT M., WEISS J.-C. (1993), La valorisation de la craie par les liants routiers, *Revue générale des routes et des aérodromes*, **712**, novembre.
- [35] Chaussées autoroutières, Journée ASFA, 21 novembre 1995 : Les couches de forme, *Revue générale des routes et des aérodromes*, **numéro hors série, hiver 1995**.

(*) 58 rue Pottier, F-78150 LE CHESNAY.

(**) 9 rue Magellan, F-75008 PARIS.

Autres publications

- [36] HABIB P., AVERSENC D. (1988), Gonflement d'un sol contenant des sulfates traité à la chaux et au ciment, *Revue française de géotechnique*, **42**, 1er trimestre. (Presses de l'ENPC, 28 rue des Saints-Pères, F-75006 PARIS).
- [37] Poussières nocives et carrières, *Mines et carrières*, **80**, janvier 1998, pp. 45-69. (Revue de l'industrie minière, 41-47 rue de la Grange aux Belles, F-75010 PARIS).
- [38] GILBERT J.-M., FRANC A. (1997), Typologie et cartographie du climat de la moitié nord de la France, *Ingénieries-EAT*, **12**, décembre. (Publications du CEMAGREF, Parc de Tourvoie, F-92540 ANTONY).
- [39] Ministère des Transports, Direction de la Météorologie nationale (1983), *Normales climatologiques 1951-1980, fascicule 1 : Températures*.
- [40] Ministère des Transports, Direction de la Météorologie nationale (1986), *Normales climatologiques 1951-1980, fascicule 2 : Précipitations*.
- [41] PAQUET J. (1996), *Mécanique et microstructure de la craie - Influence du traitement à la chaux*. Université de Lille. (Rapport disponible auprès de la société LHOIST France, 168 rue de Rivoli, F-75004 PARIS).
- Chambre syndicale des fabricants de chaux grasses et magnésiennes, 30 avenue de Messine F-75008 PARIS :
- [42] CLAUDE J. (1995), *La chaux et ses utilisations*.
- [43] Il faut chauler les calcaires. Pourquoi ? *La lettre de l'industrie de la chaux*, **7**, juillet 1996.
- [44] La chaux dans le traitement des sols (fiches techniques 1992).



Document publié par le LCPC : sous le numéro 502 381

Conception et réalisation : LCPC-IST, Jacqueline Ségurens

Dessins : LCPC-IST, Philippe Caquelard

Crédits photographiques

LCPC, LRPC de Rouen, LREP (Melun)
SCETAUROUTE

Sociétés : LHOIST France, RABAUD, PANIEN

Entreprises : GTM, MEDINGER, RAZEL, VALERIAN

Organismes professionnels : CIM-BÉTON, CSNFCGM

Flashage : Burovit

Impression : Imprimerie EP-3000

Dépôt légal : 1er trimestre 2000

Page laissée blanche intentionnellement



Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Application à la réalisation des remblais et des couches de forme

Guide technique

Ce guide codifie la technique du traitement des sols avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques utilisés en construction routière pour réaliser des remblais et des couches de forme.

La première partie du document récapitule les notions générales, relatives aux sols, chaux aériennes, liants hydrauliques et aux interactions se produisant entre ces matériaux. Ces notions sont utilisées pour justifier les règles pratiques énoncées dans les deux parties suivantes.

La deuxième partie développe l'application du traitement à la réalisation des remblais.

Deux aspects sont distingués :

- le réemploi des sols trop humides, pour lequel l'effet recherché dans le traitement est presque exclusivement de permettre l'exécution,
- la stabilisation de certaines zones particulières des remblais (partie supérieure, talus, pied des hauts remblais...) pour lesquelles une amélioration définitive des caractéristiques mécaniques est recherchée.

La troisième partie présente l'application de la technique à la réalisation des couches de forme. Elle est détaillée en trois sous-parties :

- les études géotechniques,
- les techniques et les matériels d'exécution,
- les actions d'assurance de la qualité.

Le document est complété par une série de neuf annexes développant : la production de la chaux aérienne, des ciments, des liants hydrauliques routiers, la prise compte d'éléments économiques, les règles pratiques pour éviter les émissions de poussières de produits de traitement, certaines méthodes de contrôle et d'interprétation des résultats des études et des propositions de clauses techniques pouvant être introduites dans les contrats.

This guide codifies the technique of soil stabilization with lime or hydraulic binders used to construct highway fills and capping layers.

The first section of the publication reviews general concepts concerning soils, non-hydraulic lime, hydraulic binders and the interactions that occur between these materials. These notions are useful to clarify the practical rules described in the two following parts.

The second section covers applications of stabilization to the construction of fills.

A distinction is made between two types of applications:

- *the re-use of soils with an excessive moisture content, in which case the function of stabilization is almost exclusively to permit laying,*
- *the stabilization of specific parts of fills (upper zone, slopes, the base of deep fills, etc.) for which the aim is to permanently improve mechanical performance.*

The third section presents the application of the technique to capping layers. It has three sub-sections:

- *geotechnical surveys,*
- *laying techniques and plants,*
- *quality assurance measures.*

The document ends with nine annexes covering: the production of non-hydraulic lime, cements, hydraulic binders for roads, economic considerations, practical rules to avoid dust emissions from the stabilization material, some methods for checking and analyzing the results of surveys and proposals for design specifications for possible inclusion in contracts.

Document disponible sous la référence D 9924
au prix de 220 F

à l'IST-Diffusion - LCPC
58, boulevard Lefebvre
F-75732 Paris CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 52 26
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet <http://www.lcpc.fr>

au bureau de vente du SETRA
46, avenue Aristide Briand
BP 100
F-92223 Bagneux CEDEX
Téléphone : 01 46 11 31 53
Télécopie : 01 46 11 33 55
Internet <http://www.setra.equipement.gouv.fr>