

3



Centre de recherches routières

Guide pratique

Amélioration des sols pour
terrassements et fond de coffre



Complément au Code de bonne pratique R 74/04

* Table des matières

Introduction	2
1. Prélèvements d'échantillons représentatifs	4
2. Détermination de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux	5
3. Analyse des échantillons	6
$D_{\max} \leq 50$ mm	7
$D_{\max} > 50$ mm	8
4. Etude de formulation	9
Analyse simplifiée pour chantier de taille inférieure à 5000 m ³	11
Nécessité du traitement en fonction de la portance	12
5. Exécution	13
5.1. Traitement in situ	13
5.2. Traitement en installation fixe ou mobile	14
5.3. Compactage	14
5.4. Stockage du sol traité	15
6. Contrôles	16
7. Normes	17

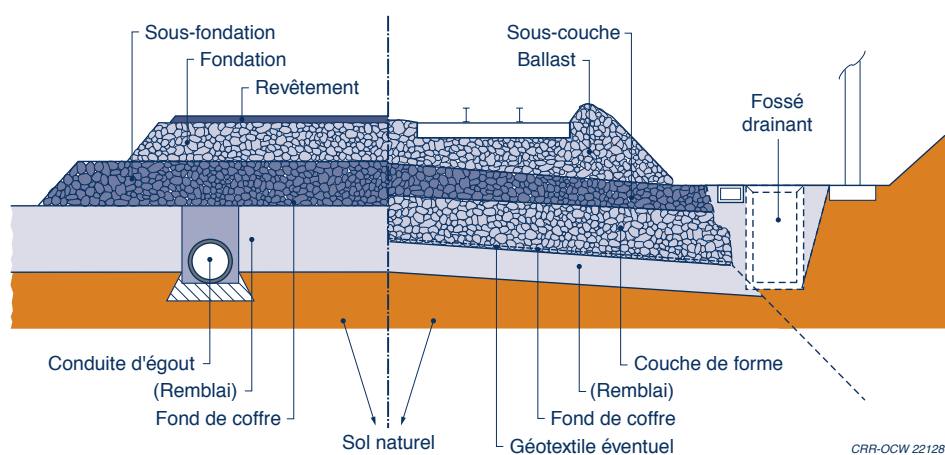
1 Introduction

Lors de l'exécution d'opérations de terrassement et la réalisation de fonds de coffre, la réutilisation en l'état des sols fins disponibles localement comme les sols sensibles à l'eau et/ou trop humides, s'avère souvent difficile. Pour leur réemploi, le traitement de ces sols avec un liant est indispensable. Cette technique est en général une alternative plus économique que l'apport de matériaux nobles.

L'ajout de l'agent de traitement permet d'obtenir une meilleure traficabilité et améliore l'aptitude du sol au compactage, assurant ainsi une mise en œuvre correcte. En outre, le liant confère au sol une portance directe, maintenue ou croissant dans le temps.

Le choix de l'agent de traitement et de son dosage est déterminé par le type de sol, sa teneur en eau au moment du traitement ainsi que par les caractéristiques visées.

Certains liants composés de chaux-ciment (cfr. Code de bonne pratique R74/04, §11.2.3.) sont actuellement disponibles sur le marché mais, par manque d'expérience avec ces produits, nous ne sommes pas en mesure de donner un avis sur la pérennité des performances des sols traités avec ces matériaux et nous nous limiterons aux deux agents de traitement bien connus: la chaux et le ciment, ainsi qu'aux liants hydrauliques routiers, qui sont normalisés mais dont nous avons peu d'expérience en Belgique.



Ce guide pratique présente une approche opérationnelle du traitement des sols. Il est constitué d'organigrammes permettant de prendre une décision rapide quant à la pertinence d'une amélioration du sol.

Il constitue un complément au document théorique général R74/04 «Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment» qui reprend des informations additionnelles indispensables à la compréhension du présent fascicule:

- description des différents types de sol et de leurs caractéristiques ainsi qu'un aperçu des essais de laboratoire à réaliser pour évaluer la pertinence d'un traitement et les dosages à appliquer;
- description des différents agents de traitement et de leurs effets sur le sol;
- description de la conduite du chantier ainsi qu'un aperçu du matériel disponible pour traiter les sols à la chaux et/ou au ciment.



Le présent guide n'a pas la vocation de se prononcer quant à la qualité environnementale du sol à recycler et part du postulat que les terres que l'on envisage d'améliorer répondent aux exigences des législations environnementales en vigueur pour l'application visée et à l'endroit considéré. Les différentes étapes à envisager en vue du traitement d'un sol pour son utilisation en terrassements et en fond de coffre sont:

Avant l'exécution des travaux:

1°) Prélèvements d'échantillons représentatifs.

2°) Détermination de l'homogénéité/hétérogénéité des matériaux.

3°) Analyse des échantillons (rassemblés en groupes homogènes):

Essais d'identification:

- granulométrie «simplifiée»:
 - D_{max} (dimension du plus gros élément);
 - passant à 2 mm;
 - passant à 63 μm ;
- teneur en eau naturelle du sol;
- valeur de bleu de méthylène (VBS) (mesure indirecte de l'argilosité du sol);
- teneur en matières organiques (MO), sulfates, etc.

➡ Classification des matériaux et détermination de l'aptitude au traitement.

4°) Etude de formulation: détermination du dosage optimal en agent de traitement en fonction des caractéristiques visées.

Au moment de l'exécution des travaux:

5°) Exécution: épandage – malaxage – compactage

Après exécution des travaux:

6°) Contrôles:

- contrôle de l'exécution;
- contrôle du mélange sol-agent de traitement;
- contrôle du compactage;
- contrôle de portance.

Les organigrammes qui suivent respectent les conventions suivantes:

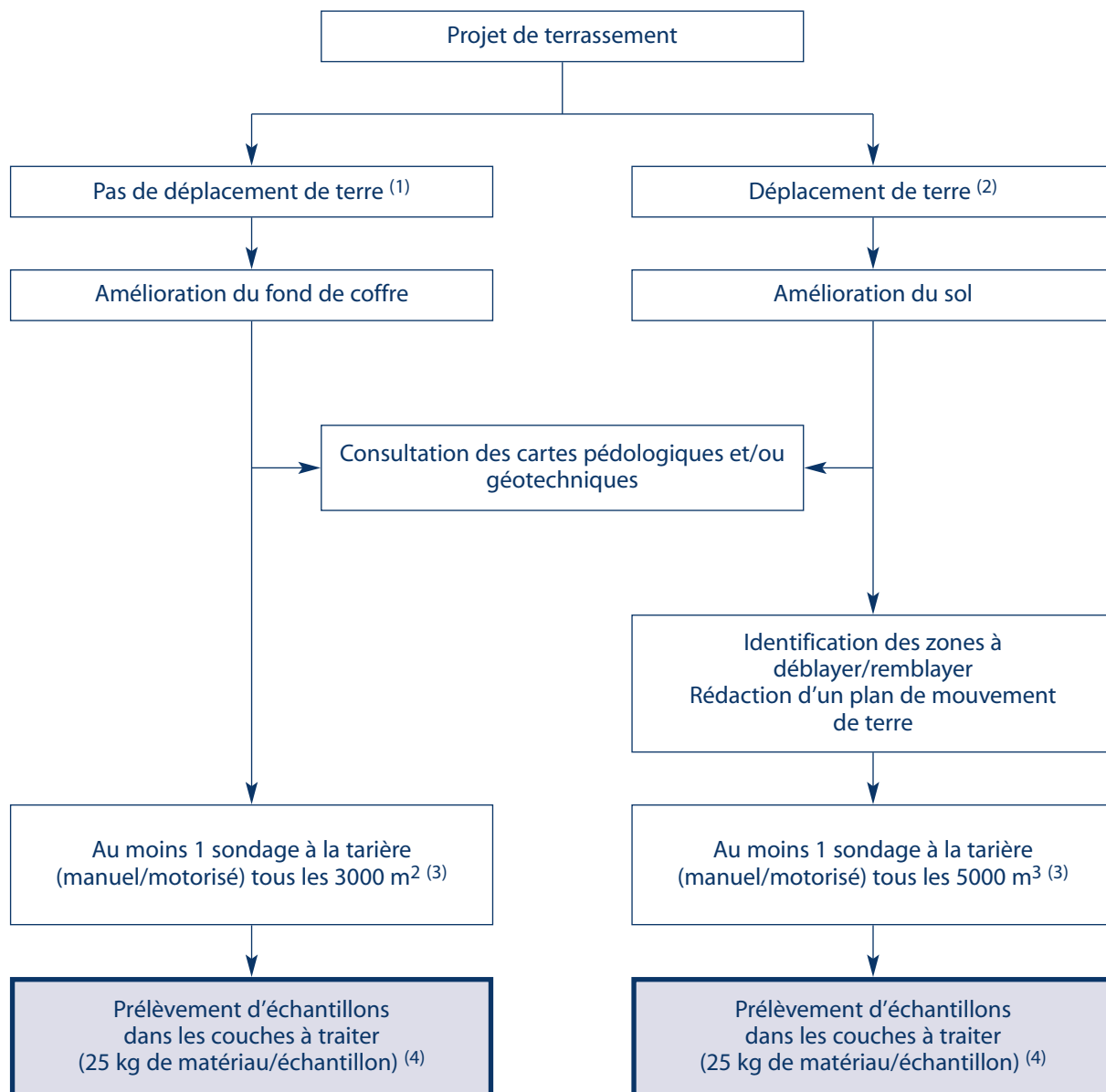


opérations réalisées par un laboratoire accepté par le maître d'ouvrage.



détermination de l'aptitude du sol à être amélioré.

1 Prélèvements d'échantillons représentatifs



¹ Le fond de coffre est réalisé sans apport de remblai.

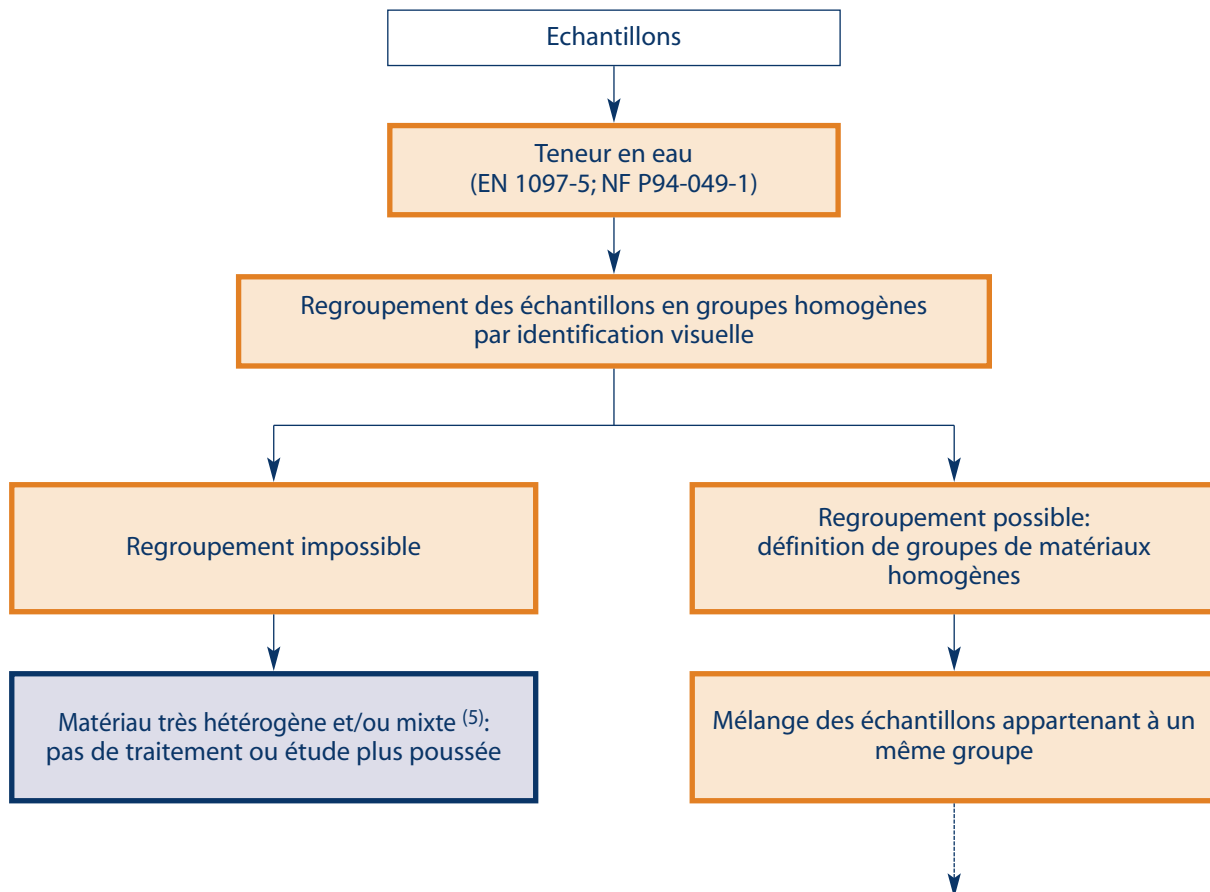
² L'établissement de la voirie nécessite des travaux de déblai et de remblai.

³ La fréquence sera adaptée en fonction du projet, des conditions locales, des impositions du maître d'ouvrage. Celle-ci peut être augmentée dans le cas de sols fortement hétérogènes.

⁴ Il faut veiller à prélever suffisamment d'échantillons pour pouvoir effectuer les différents essais détaillés ci-après. On s'assurera qu'un minimum de 200 kg d'échantillons soient prélevés pour chaque type de sol afin de pouvoir réaliser la totalité des études de laboratoire (essais d'identification + étude de formulation).

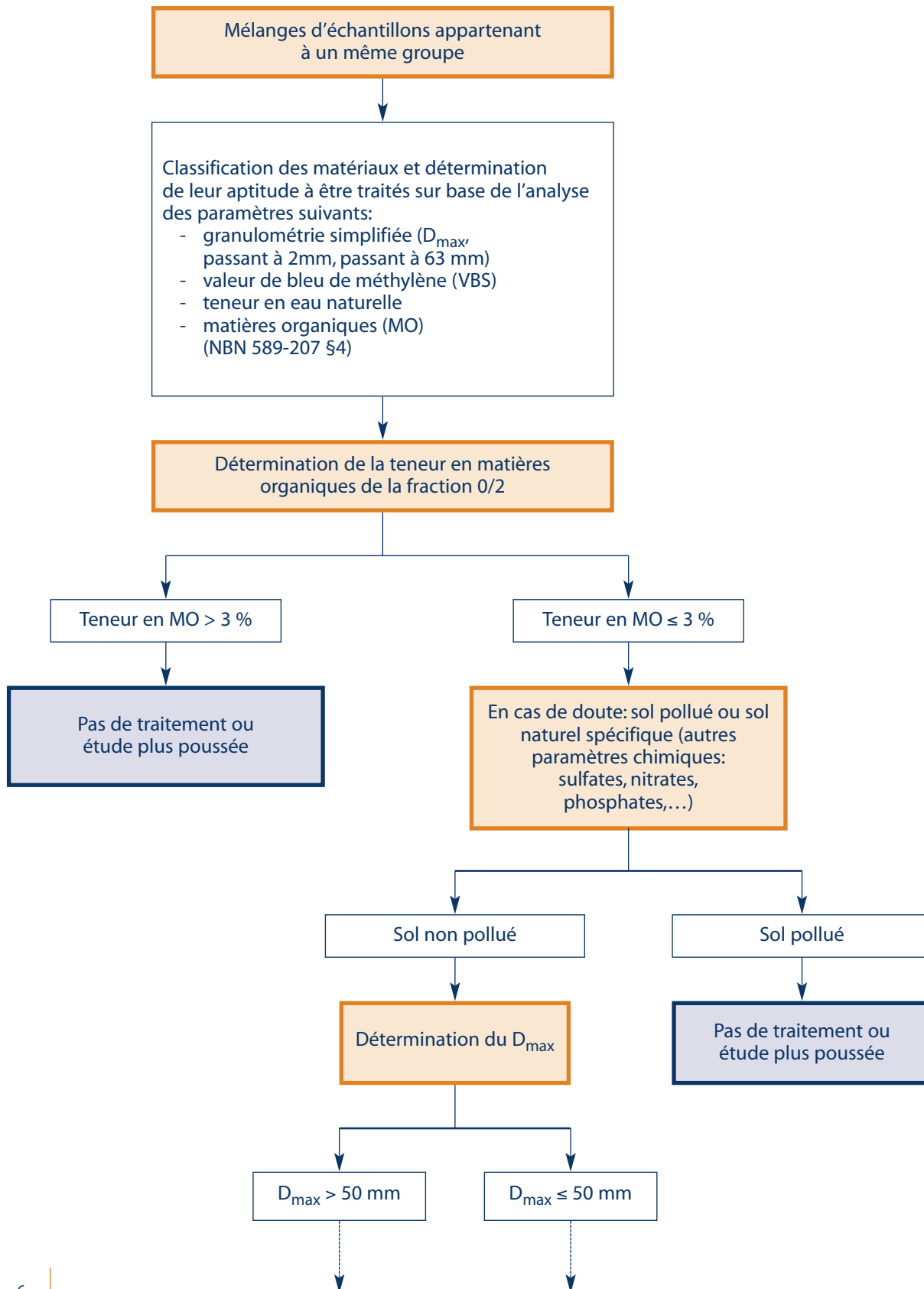


2 Détermination de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux



⁵ Un matériau mixte correspond à un mélange d'un type de matériau avec un autre type (ex: argile mélangée à du gravier ou du remblai) ou un matériau contenant des éléments de nature différente. Ce type de matériau mélangé n'est donc pas réutilisable comme un matériau homogène.

3 Analyse des échantillons



$D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ ⁶⁾

Tamisat au tamis de 63 μm

$0 / 63 \mu\text{m} \geq 35 \%$

$12 \% < 0 / 63 \mu\text{m} < 35 \%$

$0 / 63 \mu\text{m} \leq 12 \%$

Détermination de la valeur de bleu de méthylène (VBS)
(NBN EN 933-9)

$VBS \leq 25$

$25 < VBS \leq 60$

$60 < VBS \leq 80$

$VBS \leq 15$

$VBS > 15$

$VBS > 2$

$VBS \leq 2$

Sol fin peu argileux

Sol fin argileux

Sol fin très argileux

Sables et graves limoneux

Sables et graves argileux à très argileux

Tamisat au tamis de 2 mm

Sables et graves insensibles à l'eau

Apte au traitement (chaux, ciment, combiné)

Apte au traitement (chaux)

Apte au traitement (chaux)

Apte au traitement (chaux, ciment, combiné)

Apte au traitement (chaux)

Pas de traitement nécessaire (matériau insensible à l'eau)

$0 / 2 \text{ mm} \leq 70 \%$

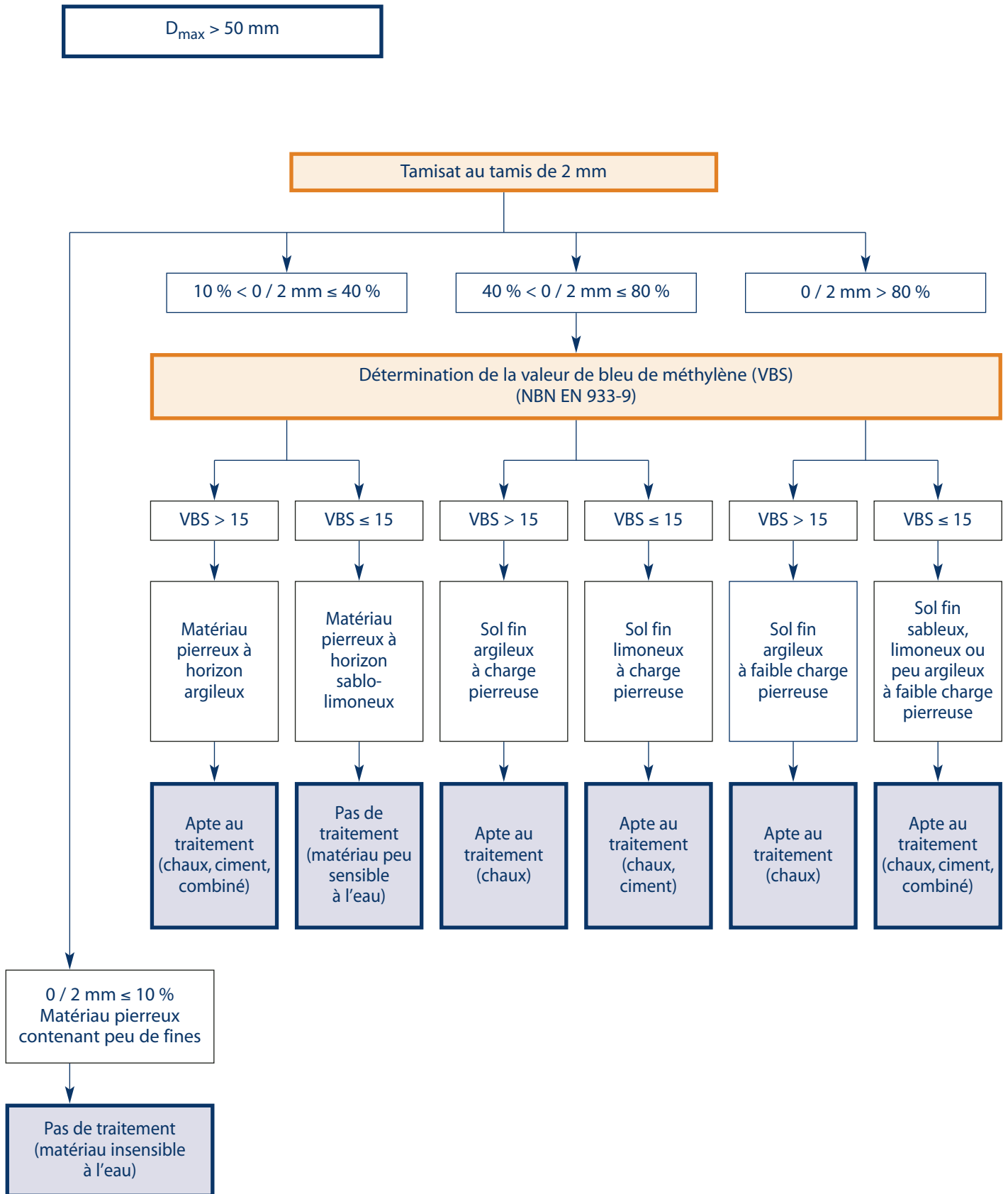
$0 / 2 \text{ mm} > 70 \%$

Graves ou sables grossiers argileux

Sables argileux

Apte au traitement (chaux, ciment, combiné)

⁶⁾ Schéma basé sur les recommandations du «Guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule II annexes techniques» LCPC - SETRA, septembre 92.



4 Etude de formulation

L'étude de formulation consiste à étudier les performances du sol traité pour différents dosages en agent de traitement, dans la plage de teneurs en eau prévisibles sur chantier.

Les résultats des études de formulation se traduisent par des abaques donnant, en fonction de l'état hydrique constaté à l'exécution, les dosages en agent de traitement à appliquer à un sol pour atteindre les caractéristiques recherchées (portance, compacité, etc.).

Détermination des graphiques

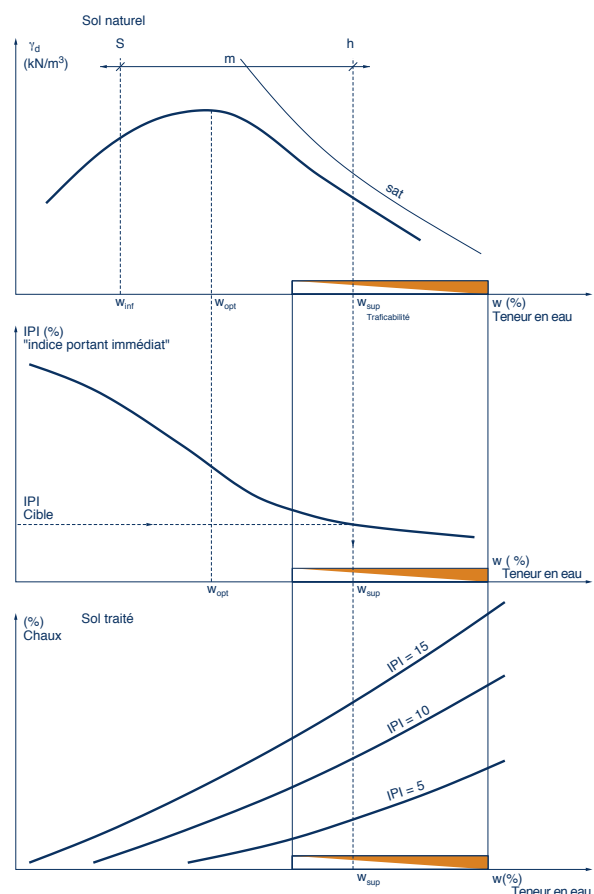
Une étude est composée de plusieurs étapes:

1. Sur des matériaux non traités, détermination de:

- la courbe Proctor normal (minimum 5 points);
- l'indice de portance (CBR pour l'application en fond de coffre et IPI pour le corps du remblai) sur les éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbe Proctor.

2. Pour 3 dosages différents en agent de traitement (en général 1, 2 et 3 % du poids sec du sol), 4 teneurs en eau sont choisies dans la plage attendue lors du chantier. Deux heures après malaxage, avec conservation sous emballage fermé hermétiquement, des échantillons sont compactés à l'énergie Proctor normal.

3. L'indice CBR ou IPI est mesuré immédiatement après compactage sur chacune des éprouvettes.



On peut ainsi tracer une courbe de variation de l'indice CBR ou IPI en fonction de la teneur en eau au compactage pour chaque dosage en chaux.

Au moment des travaux, en cas de conditions climatiques favorables (vent, temps sec et ensoleillement), une augmentation du délai entre le malaxage et le compactage permet une augmentation de la performance du compactage par une diminution complémentaire de la teneur en eau.

Choix du CBR/IPI

Dans le cas de l'exécution de remblais courants, on utilise la valeur IPI, qui est le paramètre utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantiers.

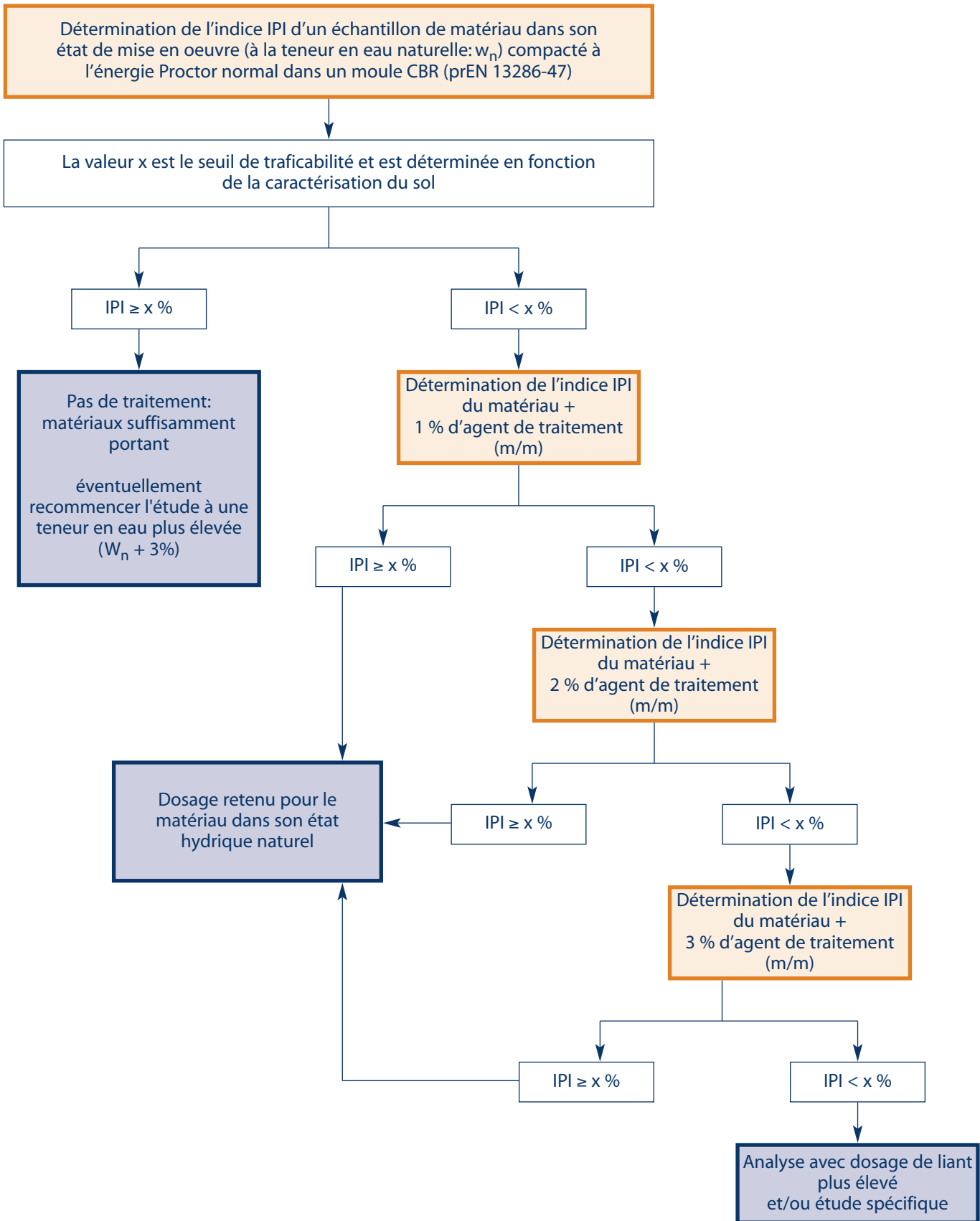
Pour des applications en fond de coffre, l'essai CBR⁽⁷⁾ est utilisé. L'indice CBR représente la portance du matériau compacté sous la charge de la structure qui surmonte la couche compactée.

Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances de l'IPI, le facteur $\text{CBR}_{4j} \text{ d'immersion} / \text{IPI}$ doit être supérieur ou égal à 1.



Analyse simplifiée pour chantier de taille inférieure à 5000 m³



Nécessité du traitement en fonction de la portance

Pour les remblais,

l'objectif de l'indice de portance est indiqué dans le tableau 1⁽⁸⁾, ci-dessous.

Tableau 1: Objectifs du traitement des sols pour la réutilisation des sols trop humides en remblai

Catégorie de sol	Valeurs d'IPI en dessous desquelles le traitement peut être envisagé	Valeurs d'IPI à obtenir sur le matériau traité	Valeurs d'IPI au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)
Sol fin peu argileux Sol fin argileux à charge pierreuse Sol fin sableux, limoneux ou peu argileux à faible charge pierreuse	8	10 à 20	15 à 25
Sol fin argileux Sables et graves argileux à très argileux Sol fin limoneux à charge pierreuse Sol fin argileux à faible charge pierreuse	5	7 à 15	10 à 20
Sol fin très argileux	3	5 à 10	8 à 15
Sables et graves limoneux Sables argileux Matériaux pierreux à horizon argileux	12	15 à 30	20 à 40
Graves ou sables grossiers argileux	15	20 à 40	40 à 50

Pour le fond de coffre,

après excavation, le fond de coffre est préalablement testé à la plaque. Si on n'obtient pas au moins 17 MPa, une étude de formulation est réalisée en laboratoire.

On confectionne en laboratoire des éprouvettes CBR compactées à l'énergie Proctor normal dans le but de déterminer le type d'agent de traitement ainsi que son dosage pour obtenir un CBR supérieur ou égal à 20.

Portance à terme: pour garantir le maintien des performances de l'indice de portance, le facteur $CBR_{4j} \text{ d'immersion} / \text{IPI}$ doit être supérieur ou égal à 1.

12 ⁸ Tableau basé sur les recommandations du «Guide technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques LCPC - SETRA, janvier 2000».

5 Exécution

Le malaxage des sols avec l'agent de traitement a lieu soit dans une installation fixe ou mobile, soit in situ, en couche étalée.

L'agent de traitement⁽⁹⁾ est de la chaux selon la norme NBN EN 459 et dont la classe correspond aux exigences des cahiers de charges CCT RW99 / CCT2000 / SB250, ou du ciment selon la norme EN 197-1, ou du liant selon la norme ENV 13282.

Le dosage est calculé sur base de la masse sèche du sol (1 % = 10 kg d'agent de traitement pour 1 tonne de sol sec).

5.1 Traitement in situ

5.1.a. Epandage de l'agent de traitement

L'épandage de l'agent de traitement se fait à l'aide d'un épandeur apte à respecter le dosage envisagé. L'épandage doit se faire sur toute la surface à traiter par bandes parallèles adjacentes, bords à bords ou, mieux, avec un recouvrement de quelques centimètres pour garantir une répartition uniforme. Pour des petits chantiers, l'épandage peut éventuellement se faire manuellement (agent de traitement en 'big bags' ou en sacs).

Le dosage ne peut différer de ± 10 % de la valeur du dosage prescrit. L'opération doit être menée de façon à réduire au maximum la production de poussière.

En cas de précipitations, l'épandage est arrêté.

5.1.b. Malaxage

Le sol est malaxé d'une façon intensive jusqu'à obtention d'un mélange homogène sur toute la surface et sur toute l'épaisseur de la couche traitée (couleur et structure uniformes).

Pour garantir cette homogénéité, en fonction de l'épaisseur de la couche et de l'engin de malaxage, plusieurs passes successives peuvent être nécessaires.

Le malaxage s'exécute par bandes longitudinales successives. Chaque bande recouvre la précédente sur une largeur minimale de 10 cm et sur une distance suffisante de manière longitudinale.

L'opération est menée de façon à limiter la production de poussière.

En cas de précipitation soudaine, le malaxage est interrompu et un premier compactage est effectué. A la reprise des travaux et dans le cas d'un traitement à la chaux, le malaxage est achevé avec, si cela s'avère nécessaire par l'augmentation de la teneur en eau, un épandage complémentaire de chaux.

Dans le cas d'un traitement au ciment, le malaxage est achevé le plus vite possible et suivi par un compactage final.

⁹ Une description des différents agents de traitement est fournie dans le document théorique R74/04 «Traitement des sols à la chaux et/ou au ciment» (chapitre II.2)

5.2 Traitement en installation fixe ou mobile

5.2.a. Dosage

L'installation doit permettre l'alimentation en agent de traitement de manière à respecter le dosage envisagé. Le dosage ne peut différer de $\pm 10\%$ de la valeur prescrite.

5.2.b. Malaxage

Le mélange doit être homogène à la sortie de l'installation: aspect de couleur et de structure uniforme.

5.2.c. Stockage

En cas d'utilisation de ciment, le stockage n'est pas autorisé.

5.3 Compactage

Pour le compactage du mélange sol-agent de traitement, le nombre de passes dépend du type de sol, de l'épaisseur de la couche et du type de compacteur.

Le réglage définitif des couches traitées se fait par rabotage sur toute la surface et dans aucun cas, par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses.

Afin d'obtenir le degré de compactage et la portance exigés, il est avisé de limiter l'épaisseur de la couche à **30 cm**. Une épaisseur supérieure peut être appliquée si l'entreprise prouve que les moyens de compactage permettent une épaisseur supérieure (limitée à 45 cm).

Des valeurs pour l'épaisseur de la couche traitée et pour le délai de compactage peuvent également être fixées dans les cahiers des charges tels que CCT RW99, CCT2000, SB250, etc.

Dans le cas de l'utilisation de ciment, le compactage et le réglage se terminent dans les 2 heures après le début de malaxage.

En cas d'utilisation de chaux, il est conseillé, par temps sec, de laisser le mélange exposé à l'air (généralement 1 à 3 h) pour favoriser l'évaporation de l'eau. La durée d'aération dépend aussi de l'organisation du chantier.



En fin de journée, il est conseillé de fermer la surface en compactant au rouleau lisse ou au rouleau à pneus. Il faut prendre des mesures pour évacuer les eaux de pluie.

5.4 Stockage du sol traité

En cas d'utilisation de ciment, le compactage du sol-ciment doit avoir lieu immédiatement après l'incorporation de celui-ci.

Un mélange sol-chaux peut éventuellement être stocké pendant une période maximale d'environ 3 mois, pour autant qu'il soit protégé des précipitations.

Pour la zone de stockage du sol traité, il convient d'assurer un bon écoulement des eaux superficielles afin d'éviter la stagnation de l'eau au pied des sols stockés.

Au moment de la réutilisation, il convient de remesurer la teneur en eau et d'éventuellement ajuster celle-ci par un traitement complémentaire pour obtenir la teneur en eau optimale déterminée en phase de projet.

6 Contrôles

Les tests qui permettent de contrôler les caractéristiques recherchées sont les suivants.

Contrôle de l'agent de traitement utilisé

Au moment de la livraison:

Vérification des bons de livraisons, des marques de certification (BENOR, marquage CE) et de la conformité des agents de traitement aux exigences du cahier spécial des charges et à l'étude de laboratoire. Si l'agent de traitement n'est pas conforme, procéder à la vérification des paramètres (voir cahiers des charges et normes en vigueur).

Après stockage:

Pour la chaux: vérification de la réactivité T60 et la teneur en CaO disponible (voir cahiers des charges).

Contrôle de l'exécution

- Le contrôle de l'épandage se fait ponctuellement par le pesage d'une bêche de 0,5 m² ou d'une platine de surface connue et, en global, par le contrôle quotidien du poids total épandu sur une surface donnée.
- Le contrôle de l'humidité du sol traité avant compactage se fait par la détermination de la teneur en eau d'un échantillon retiré de la couche non compactée.
- L'épaisseur de la couche après compactage est vérifiée par des sondages dans la couche traitée. En cas de doute, une solution de phénolphtaléine peut indiquer la transition entre sol traité et non traité (voir le Guide pratique 2 pour couches de sous-fondations).

Le cas échéant:

- Contrôles du malaxage⁽¹⁰⁾: divers essais de contrôle permettent de vérifier la bonne réalisation du malaxage (profondeur de malaxage, homogénéité du mélange). Nous renvoyons le lecteur au document théorique R74/04 «Traitement des sols à la chaux et/ou au ciment» pour la description de ces essais.
- Contrôle de portance⁽¹⁰⁾: un échantillon de sol traité est compacté à l'énergie Proctor normal et la valeur IPI ou CBR est vérifiée. A faire à chaque changement de dosage.

Contrôle du compactage

- Essai à la plaque dans les délais prescrits dans les cahiers des charges:
(en surface de chaque couche compactée)
 - Corps du remblai: le module de compressibilité M1 doit être ≥ 11 MPa.
 - Dernier mètre du terrassement et niveau du fond de coffre:
le module de compressibilité M1 doit être ≥ 17 MPa.
- Sonde de battage dynamique:
 - Sonde de battage légère de type CRR: enfoncement < 40 mm/coup.
 - Panda
 - Degré de densification > 95 % de l'OPN en corps de remblai.
 - Degré de densification > 98 % de l'OPN dans le dernier mètre du terrassement.



7 Normes

NBN EN 1097-5

Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats
Partie 5: Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée.

NF P 94-049-1

Sols: Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux
Partie 1: Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.

NBN 589-207 § 4

Essais des sables de construction - Teneur en matières organiques.

NBN EN 933-9

Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats
Partie 9: Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène.

prEN 13286-47

Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test methods for the determination of California Bearing Ratio (CBR), Immediate Bearing Index (IBI) and linear swelling.

NBN EN 197-1

Ciment - Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NBN EN 459-1

Chaux de construction - Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité.

NBN EN 459-2

Chaux de construction - Partie 2: Méthode d'essai.

NF P 94-093

Sols: reconnaissance et essais: Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié.

NF P 94-078

Sols: reconnaissance et essais: Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice portant immédiat - Mesure sur l'échantillon compacté dans le moule CBR.



C e n t r e d e r e c h e r c h e s r o u t i è r e s

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

Boulevard de la Woluwe 42

1200 Bruxelles

Tél. : 02 775 82 20 - fax : 02 772 33 74