

# 4



Centre de recherches routières

## Guide pratique

Plates-formes industrielles  
Fondations par traitement de sol



Complément au Code de bonne pratique R 81/10



# Table des matières

1. Introduction	3
1.1 Objectif de ce guide	3
1.2 Dimensionnement des dalles industrielles et module de Westergaard	3
1.3 Campagne de reconnaissance géotechnique	4
1.4 Limitations des conditions d'utilisation de la dalle	4
2. Choix du niveau de performance de la fondation	7
2.1 Essai initial sur sol non traité	7
3. Prélèvement d'échantillons représentatifs	8
4. Détermination de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux	9
5. Analyse des échantillons	10
6. Etude de formulation	13
6.1 Traitement à la chaux	13
6.2 Traitement au LHR ou au ciment	15
7. Exécution	18
7.1 Traitement	18
7.2 Compactage	20
7.3 Protection superficielle	21
7.4 Traficabilité et protection contre les sollicitations de trafic	21
7.5 Conditions climatiques	22
7.6 Stockage du sol traité	22

8. Contrôles	23
8.1 Mesure du module de Westergaard initial	23
8.2 Contrôle du produit utilisé	23
8.3 Contrôle de l'exécution	23
8.4 Contrôle de réception	24
8.5 Planche d'essai	24
Annexe 1	
Aptitude des différents liants à traiter les sols en fonction des types de sol	25
Normes	26
Références	28

### *Remarques préliminaires*

Ce document est un guide pratique. Il suggère les principes et la manière pratique d'aborder le problème du traitement des sols. Il ne se substitue pas aux normes en vigueur ni aux cahiers des charges-type.

[N1], [R1], etc. dans la marge de gauche renvoient aux titres complets des normes et ouvrages de référence qui figurent à la fin du présent guide (pages 26 à 28).

# 1 Introduction

## 1.1 Objectif de ce guide

L'objectif de ce guide est de favoriser le traitement du sol sous-jacent à la dalle industrielle, avec un liant, évitant ainsi la substitution de celui-ci par une couche de fondation granulaire.

Le traitement du sol aura pour objectif d'atteindre une valeur satisfaisante du module de réaction mesuré à la plaque de Westergaard. Le critère de ce module de Westergaard sera défini dans le cahier spécial des charges et ne sera jamais inférieur à 30 MPa/m.

On fera la distinction entre deux types de traitement: les fondations courantes et les fondations à haute performance.

Ce guide pratique présente une approche opérationnelle du traitement des sols sous les dalles industrielles. Il est constitué d'organigrammes permettant de prendre une décision rapide quant à la pertinence d'un traitement.

Ce guide n'envisagera que les agents de traitement normalisés: la chaux, le ciment et les liants hydrauliques routiers (LHR).

[R1] Le guide est un complément au document théorique général *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (R81/10)* qui reprend des informations complémentaires 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.



Le 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 de traiter répondent aux exigences des législations environnementales en vigueur pour l'application envisagée et à l'endroit considéré.

## 1.2 Dimensionnement des dalles industrielles et module de Westergaard

[N16] Le dimensionnement des dalles industrielles se base traditionnellement sur le paramètre de raideur du sol défini par le module de Westergaard (Kw), mesuré par un essai à la plaque de Westergaard (plaque de 762 mm de diamètre).

Bien que le principe de l'essai à la plaque de Westergaard soit similaire à l'essai routier appliqué couramment en Belgique, les dimensions de la plaque (762 mm de diamètre) et l'amplitude de la contrainte exercée (70 kPa) sont différentes, ce qui ne permet pas d'utiliser les coefficients de compressibilité ME de l'essai à la plaque routier dans le cas d'une dalle industrielle.

[R4] Le principe du calcul de dimensionnement est décrit dans la Note d'Information Technique (NIT) établie par le CSTC (Dimensionnement des sols industriels sur terre-plein).

[R3] Ce guide pratique complète la NIT 204 et ne concerne que le traitement du sol support, en précisant les conditions de mise en œuvre du traitement.

### 1.3 Campagne de reconnaissance géotechnique

Une reconnaissance géotechnique est indispensable pour définir les paramètres du sol support. La reconnaissance géotechnique doit non seulement définir les paramètres de sol en surface mais également préciser les paramètres géotechniques **jusqu'à la profondeur nécessaire pour le calcul de la structure et de la dalle**.

La reconnaissance géotechnique est effectuée par des essais de sol in situ (forages, sondages pressiométriques, sondages pénétrométriques) et en laboratoire. L'importance des essais dépend de la nature du sol et des sollicitations sur la dalle.

Cette investigation s'inscrit dans le cadre du dimensionnement de la structure du bâtiment industriel pour le choix de la conception du système de fondations (superficielles ou profondes).

Les essais à la plaque ne doivent pas être considérés comme des essais de reconnaissance du sol et sont essentiellement employés aux fins de vérification des performances de la fondation ou de la couche de support immédiatement située sous la dalle.

### 1.4. Limitations des conditions d'utilisation de la dalle

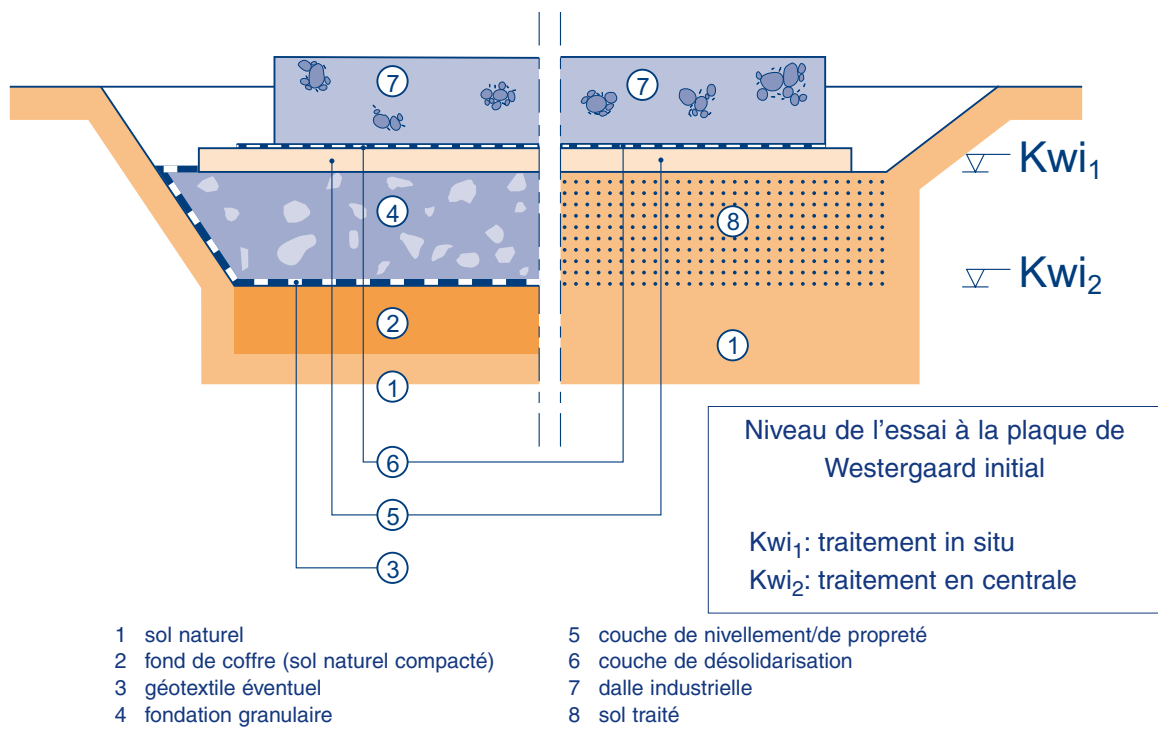
Ce guide pratique se limite à la préparation du sol support pour les dalles industrielles **intérieures, protégées des conditions climatiques**. Par conséquent, les aspects du traitement des sols liés au gel ou au drainage ne seront pas abordés dans ce guide.

Pour des conditions d'utilisation différentes, il est préférable de se référer au Guide pratique 2 [R5] *Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation*.

Schéma illustratif de comparaison  
entre la fondation classique et la fondation par traitement de sol

Situation classique:  
Apport d'une fondation granulaire

Sol traité,  
in situ ou en centrale



Les différentes étapes à envisager en vue du traitement d'un sol sous une dalle industrielle sont:

**Avant l'exécution des travaux:**

- [N16] - choix du niveau de performance de la fondation (chapitre 2)  
et mesure du module de Westergaard initial ( $K_{wi}$ )
- prélèvements d'échantillons représentatifs (chapitre 3)
- détermination de l'homogénéité/hétérogénéité des matériaux (chapitre 4)
- analyse des échantillons (rassemblés en groupes homogènes):  
essais d'identification (chapitre 5):
- [N17] - granulométrie «simplifiée»:
  - $D_{max}$  (dimension du plus gros élément)
  - passant à 2 mm
  - passant à 63  $\mu\text{m}$
- [N1] - teneur en eau naturelle du sol
- [N3] - valeur de bleu de méthylène du sol (MB) (mesure indirecte de l'argilosité du sol)
- [N2] - teneur en matières organiques (MO), sulfates, etc.  
→ Classification des matériaux et détermination de l'aptitude au traitement
  
- étude de formulation: détermination du dosage<sup>(1)</sup> optimal en agent de traitement en fonction des performances visées (chapitre 6).

**Au moment de l'exécution du traitement du sol:**

- exécution: épandage - malaxage - compactage - stockage (chapitre 7)
  
- contrôles (chapitre 8):
  - contrôle de l'agent de traitement utilisé
  - contrôle de l'exécution
  - contrôle de réception (essai à la plaque de Westergaard)

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 traité

## 2 Choix du niveau de performance de la fondation

Le principe général du dimensionnement de la dalle de béton pour une plate-forme industrielle se base, pour les paramètres de raideur du support, sur un module de Westergaard:

- [N16]
- soit mesuré par l'essai à la plaque de Westergaard;
  - soit estimé sur base des paramètres issus de la reconnaissance géotechnique.

L'hypothèse prise en compte pour le calcul doit être vérifiée lors de la préparation du support, avant d'installer l'élément structurel de la dalle industrielle.

Le cahier spécial des charges définit le niveau de performance de la fondation traitée:

- soit pour une fondation à faible performance<sup>(2)</sup>  $K_w = 30 \text{ à } 40 \text{ MPa/m}$
- soit pour une fondation courante  $K_w = 40 \text{ à } 50 \text{ MPa/m}$
- soit pour une fondation à haute performance  $K_w > 50 \text{ MPa/m}^{(3)}$

### 2.1 Essai initial sur sol non traité

Afin de déterminer la faisabilité du traitement, un essai à la plaque de Westergaard sera réalisé sur le sol en place non traité<sup>(4)</sup> (mesure du module de Westergaard initial:  $K_{wi}$ ).

Le critère définissant la valeur minimale du module de Westergaard à partir duquel la fondation courante ou la fondation haute performance peut être envisagée par un traitement in situ du sol en une seule couche est:

Critère de traitement monocouche

**$K_{wi} > 30 \text{ MPa/m}$**

En dessous de cette valeur, le traitement in situ en une seule couche ne peut pas être envisagé et il sera nécessaire de prévoir un déblai pour atteindre un fond de coffre satisfaisant et procéder soit à un

- [R6]
- remblai, en traitant chaque couche (cfr Guide pratique 3 *Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre*), soit à une substitution si le traitement n'est pas possible.

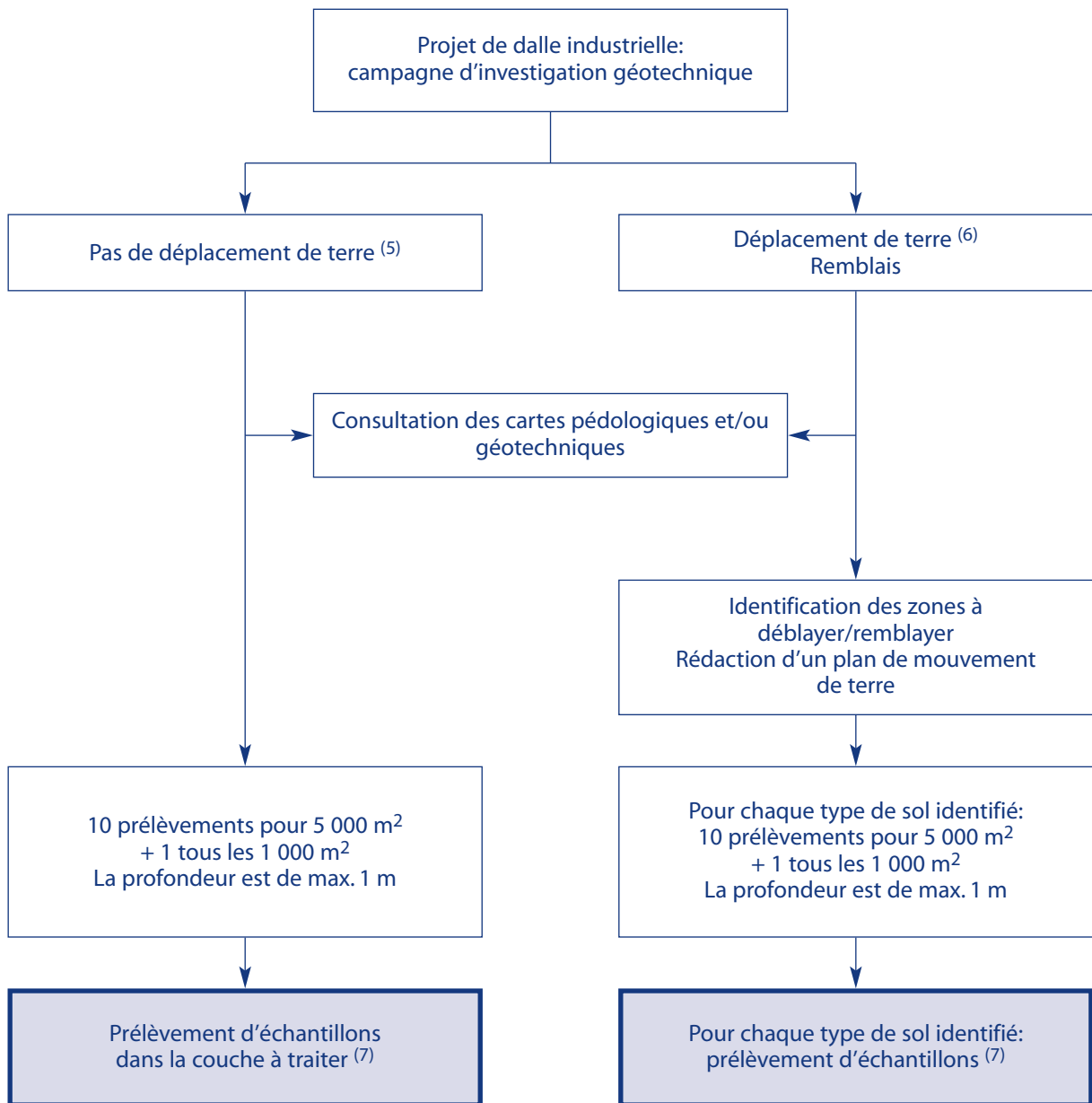
**Exception:** si le module de Westergaard initial ( $K_{wi}$ ) est compris entre 20 et 30 MPa/m, l'amélioration du fond de coffre peut être envisagée par un traitement in situ du sol en une seule couche pour une fondation à faible performance, avec un module de Westergaard après traitement de 30 MPa/m minimum.

<sup>2</sup> La fondation à faible performance doit être considérée comme un cas exceptionnel, elle constitue une dérogation à la condition sur le module initial de Westergaard (voir exception ci-dessus).

<sup>3</sup> Classiquement les modules de Westergaard des fondations à haute performance se situent entre 60 à 80 MPa/m.

<sup>4</sup> Pour un traitement in situ, cette mesure est réalisée au niveau du sol excavé, en surface du sol à traiter. Pour un traitement en centrale, cette mesure est réalisée en fond de coffre, sous la couche de sol traité.

### 3 Prélèvements d'échantillons représentatifs



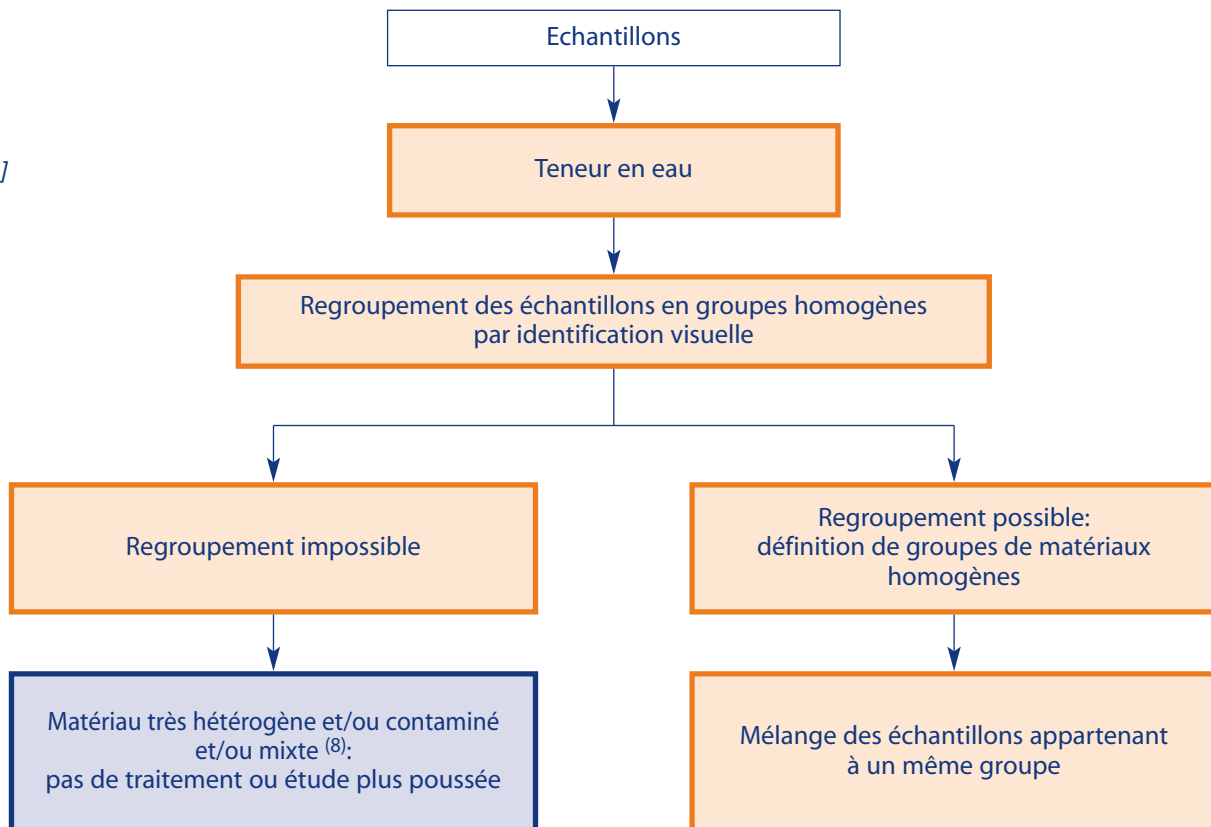
<sup>5</sup> La couche support de la dalle est réalisée sans apport de remblai.

<sup>6</sup> L'établissement de la dalle industrielle nécessite des travaux de déblai et de remblai.

<sup>7</sup> Il faut veiller à prélever suffisamment d'échantillons pour pouvoir effectuer les différents essais de laboratoire détaillés ci-après (essais d'identification + étude de formulation). On s'assurera qu'un minimum de 25 kg soit prélevé par échantillon pour chaque type de sol, avec un minimum de 200 kg au total.

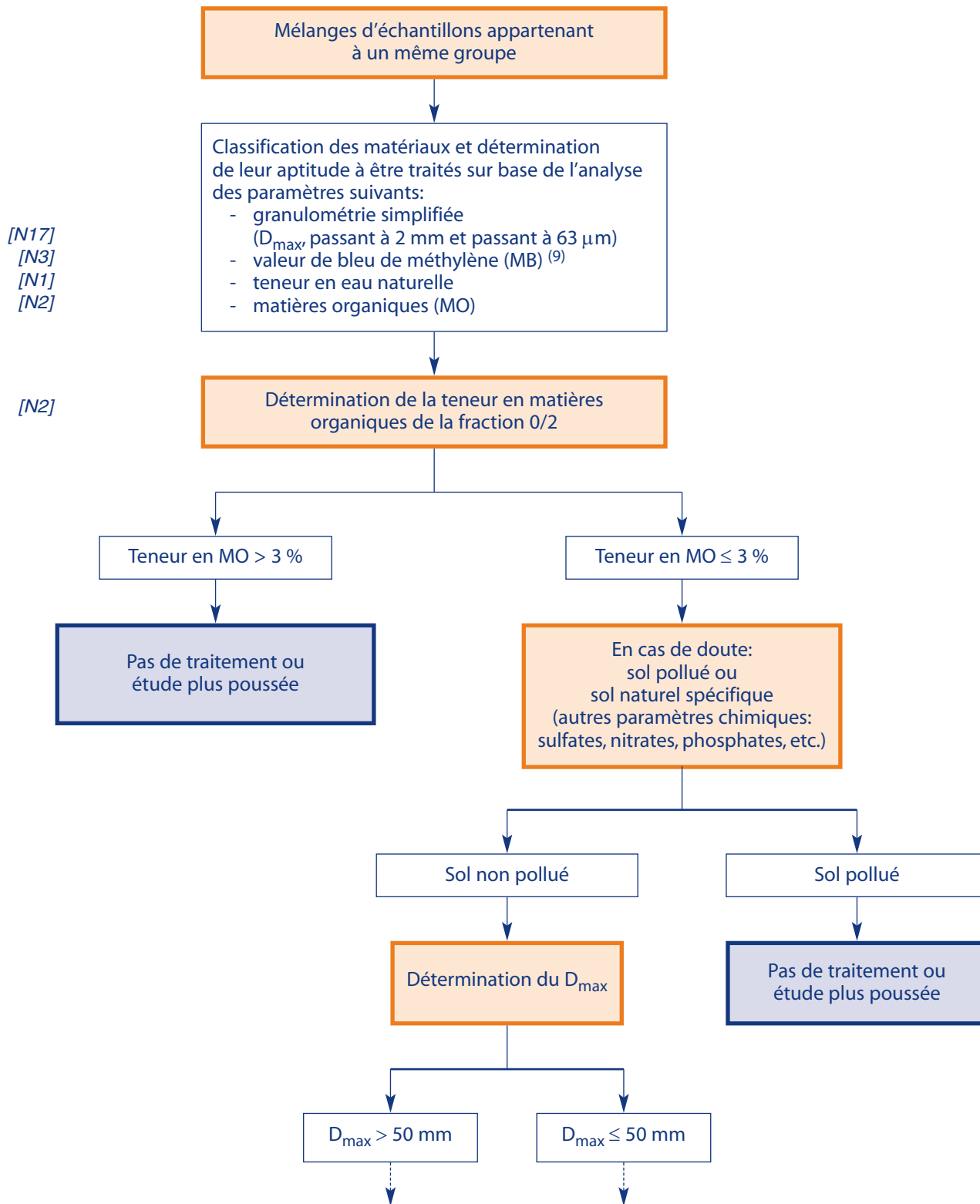
## 4 Détermination de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux

[N1]



<sup>8</sup> 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.

## 5 Analyse des échantillons



Sur base de la classification des sols décrite ci-après, différents liants sont proposés dans les organigrammes suivants. Ils sont repris dans l'annexe 1.

$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$  <sup>(10)</sup>

Tamisat au tamis de  $63 \mu\text{m}$

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

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

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

Détermination de la valeur de bleu de méthylène (MB)

$MB \leq 25$      $25 < MB \leq 60$      $60 < MB \leq 80$      $MB \leq 15$      $MB > 15$      $MB \leq 2$      $MB > 2$

Limons et argiles peu plastiques

Limons et argiles

Argiles très plastiques

Sables et graves limoneux

Sables et graves argileux à très argileux

Sables ou graves insensibles à l'eau

Tamisat au tamis de 2 mm

chaux, ciment, LHR

chaux, LHR

chaux, LHR

chaux, ciment, LHR

chaux, LHR

ciment, LHR

ciment, LHR

chaux, mixte, LHR

chaux, mixte, LHR

mixte, ciment, LHR

chaux, mixte, LHR

ciment, LHR

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

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

Graves ou sables grossiers argileux

Sables argileux

chaux, ciment, LHR

chaux, ciment, LHR

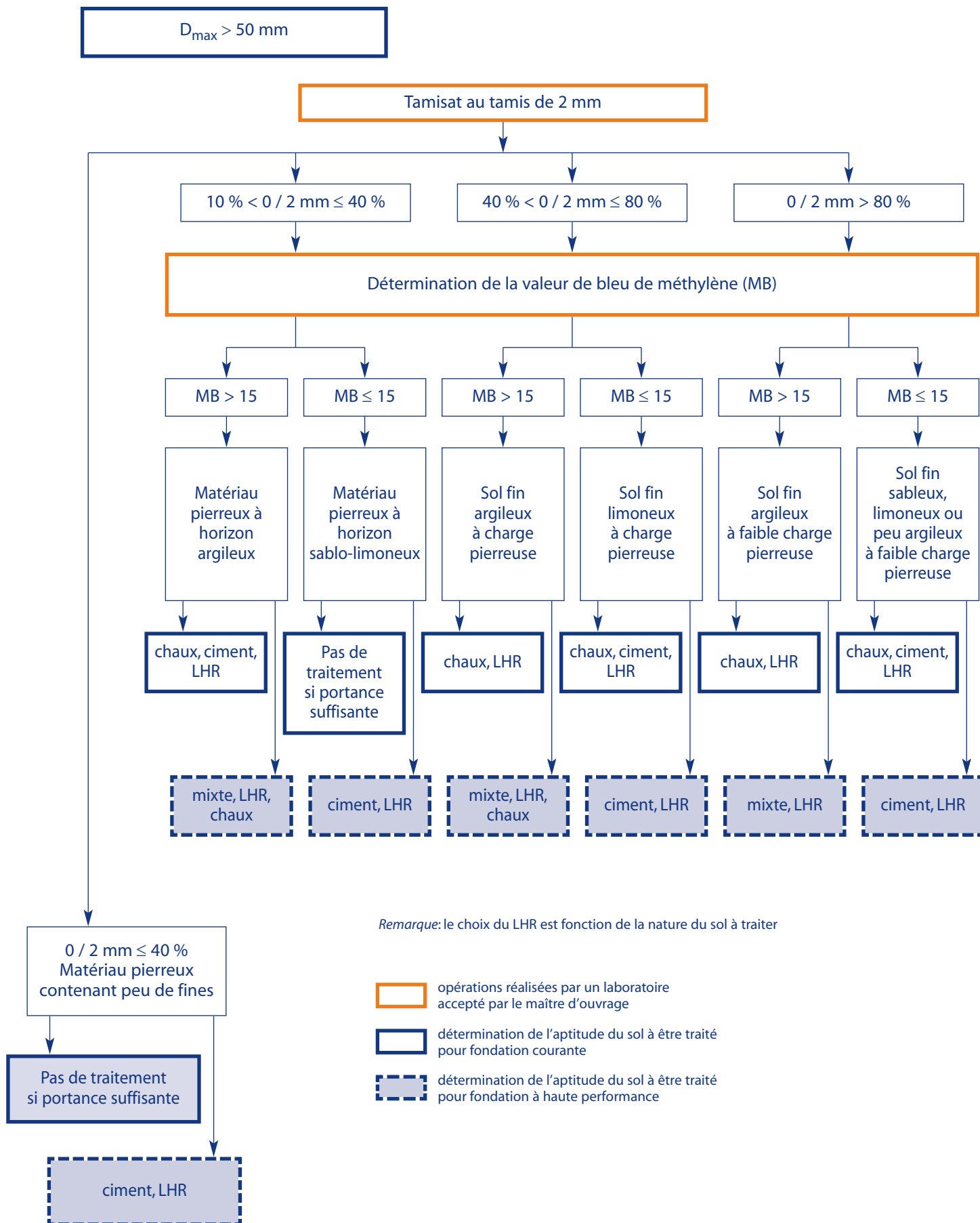
ciment, LHR

ciment, LHR

Remarque: le choix du LHR est fonction de la nature du sol à traiter

- opérations réalisées par un laboratoire accepté par le maître d'ouvrage
- détermination de l'aptitude du sol à être traité pour fondation courante
- détermination de l'aptitude du sol à être traité pour fondation à haute performance

[R7] <sup>10</sup> Schéma basé sur les recommandations du Guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule II: Annexes techniques, LCPC – SETRA, septembre 1992



## 6 Etude de formulation

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

L'objectif de cette étude de formulation est de déterminer le dosage optimal de liant à utiliser pour obtenir un critère de performance fixé.

Les résultats de l'étude de formulation se traduisent par des abaques donnant pour un sol identifié, en fonction de son état hydrique, les dosages en liant à appliquer pour atteindre les performances recherchées.

### 6.1 Traitement à la chaux

#### 6.1.1 Fondations courantes

Cette étude a pour but de déterminer le dosage optimal de chaux à utiliser pour obtenir un indice de portance  $CBR_{4j \text{ immersion}} > 20 \%$  (CBR après 4 jours d'immersion).

A titre indicatif, les dosages classiquement utilisés pour les fondations courantes sont compris entre 2 et 4 % de la masse sèche du mélange.

##### 6.1.1.a Détermination des graphiques

Une étude est composée de plusieurs étapes.

1. Sur des matériaux non traités, détermination de:

- [N4] - la courbe Proctor normal (minimum 5 points);
- [N6] - l'indice de portance ( $CBR_{4j \text{ immersion}}$ ) sur les éprouvettes ayant servi à l'établissement de la courbe Proctor.

2. Pour 3 dosages différents en chaux, 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  $CBR_{4j \text{ immersion}}$  est mesuré sur chacune des éprouvettes.

On peut ainsi tracer une courbe de variation de l'indice ( $CBR_{4j \text{ immersion}}$ ) en fonction de la teneur en eau au compactage pour chaque dosage.

### 6.1.1.b Critère de traficabilité

Pour garantir la faisabilité du réglage de la couche traitée et éviter un orniérage trop important qui peut induire des risques de sous-épaisseur du béton, le critère de traficabilité doit

[N6] être vérifié:

- IPI
- sols fins argileux: IPI > 10
  - sols fins sableux: IPI > 15
  - sables et graves: IPI > 20

### 6.1.1.c Gonflement

Le gonflement linéaire mesuré lors de l'essai  $CBR_{4j}$  immersion < 3 mm: LS<sub>3</sub>.

[N6] mode opératoire | [N9] classes

### 6.1.1.d Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances à terme en conditions humides, le facteur

[N6]  $CBR_{4j}$  immersion / IPI doit être supérieur ou égal à 1<sup>(11)</sup>.

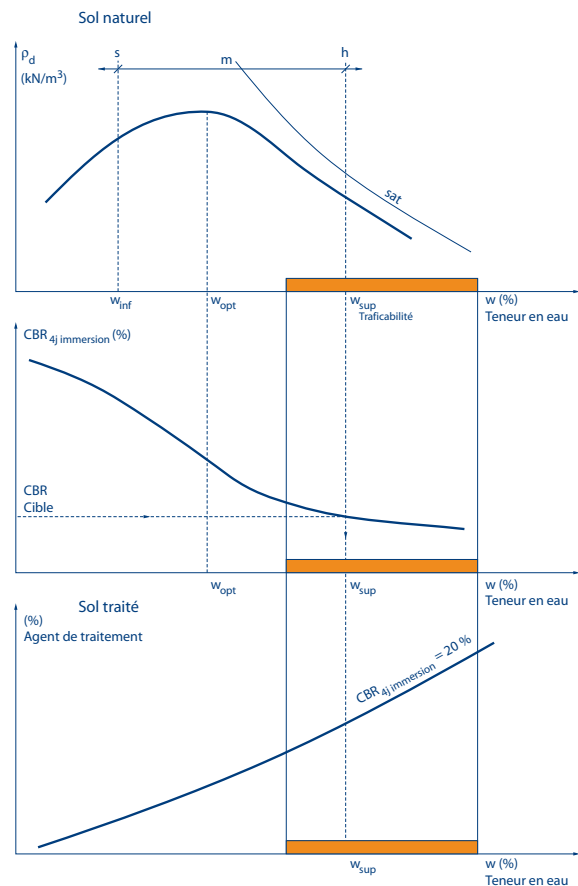
### 6.1.1.e Procédure simplifiée

La procédure simplifiée a pour but de contrôler que, pour le dosage choisi, à la teneur en eau naturelle du chantier, l'indice  $CBR_{4j}$  immersion est effectivement supérieur à 20 %.

## 6.1.2 Fondations à haute performance

Cette étude a pour but de déterminer le dosage optimal de chaux à utiliser pour obtenir un indice de portance  $CBR_{4j}$  immersion > 40 %.

La détermination des abaques est analogue à celle réalisée pour les fondations courantes traitées à la chaux (cf. § 6.1.1), mais avec des dosages en chaux différents. A titre indicatif, ces dosages sont compris entre 3 et 8 % de la masse sèche du mélange.



#### 6.1.2.a Critère de traficabilité

Pour garantir la faisabilité du réglage de la couche traitée et éviter un orniérage trop important qui peut induire des risques de sous-épaisseur du béton, le critère de traficabilité doit être vérifié:

- [N6] IPI
- sols fins argileux: IPI > 10
  - sols fins sableux: IPI > 15
  - sables et graves: IPI > 20

#### 6.1.2.b Gonflement

Le gonflement linéaire mesuré lors de l'essai  $CBR_{4j \text{ immersion}} < 1 \text{ mm}$ :  $LS_1$ .

[N6] mode opératoire | [N9] classes

#### 6.1.2.c Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances à terme en conditions humides, le facteur  $CBR_{4j \text{ immersion}}/IPI$  doit être supérieur ou égal à 1<sup>(12)</sup>.

## 6.2 Traitement au LHR ou au ciment

### 6.2.1 Fondations courantes

Cette étude a pour but de déterminer le dosage optimal de LHR ou de ciment à utiliser pour obtenir le critère de portance.

#### 6.2.1.a Critère de portance

[N6] L'essai de référence est un CBR exécuté sur un mélange sol-liant, après 3 jours de cure, suivi de 4 jours d'immersion:  $CBR_{3j+4j \text{ immersion}}$ . Les conditions de conservation de ces éprouvettes pendant la période de cure doivent être conformes à la norme: 98 % d'humidité et 20 °C.

Le critère est  $CBR_{3j+4j \text{ immersion}} > 20 \%$

La détermination des abaques est analogue à celle réalisée pour les fondations courantes traitées à la chaux (cf. § 6.1.1). A titre indicatif, les dosages en LHR ou en ciment sont habituellement compris entre 2 et 4 % de la masse sèche du mélange.

<sup>12</sup> Si le résultat de cet essai n'est pas satisfaisant, une étude approfondie doit être menée pour analyser l'évolution des caractéristiques du sol traité.

### 6.2.1.b Critère de traficabilité

Pour garantir la faisabilité du réglage de la couche traitée et éviter un orniérage trop important qui [N6] peut induire des risques de sous-épaisseur du béton, le critère de traficabilité doit être vérifié:

- IPI
- sols fins argileux: IPI > 10
  - sols fins sableux: IPI > 15
  - sables et graves: IPI > 20

### 6.2.1.c Gonflement

Le gonflement linéaire mesuré lors de l'essai  $CBR_{3+4j}$  immersion < 3 mm:  $LS_3$ .

[N6] mode opératoire | [N8], [N10] classes

### 6.2.1.d Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances à terme en conditions humides, le facteur [N6]  $CBR_{3+4j}$  immersion/IPI doit être supérieur ou égal à 1<sup>(13)</sup>.

### 6.2.1.e Procédure simplifiée

La procédure simplifiée a pour but de contrôler que, pour le dosage choisi, à la teneur en eau [N6] naturelle du chantier, l'indice  $CBR_{3+4j}$  immersion est effectivement supérieur à 20 %.

## 6.2.2 Fondations à haute performance

Cette étude a pour but d'une part de déterminer le dosage optimal de LHR ou de ciment à utiliser pour obtenir le critère de portance (ou de résistance) et d'autre part de déterminer le temps de cure nécessaire permettant de garantir certaines performances (p. ex. traficabilité).

### 6.2.2.a Critères de base

[N5] L'essai de référence est la résistance à la compression simple (Rc).

Temps de cure (délai) permettant la mise en circulation du trafic de chantier:

$$Rc > 1 \text{ MPa}$$

Critère de portance:

$$R_{C28j} > 1,5 \text{ MPa}$$

Sensibilité à l'eau:

$$R_{C14j+14j \text{ immersion}}/R_{C28j} > 0,6 \text{ (MB > 6)}$$
$$> 0,8 \text{ (MB} \leq 6)$$

*Remarque:* ces essais peuvent également être réalisés à 60 jours.

$$R_{C28j+32j \text{ immersion}}/R_{C60j}$$

#### 6.2.2.b Etude en laboratoire

L'étude consiste en plusieurs points:

- détermination de l'OPN après traitement;
- confection des éprouvettes avec compacité équivalente à 100 % de l'OPN;
- mesure des résistances  $R_c$ ;
- détermination du temps de cure.

A titre indicatif, les dosages en LHR ou en ciment sont habituellement compris entre 4 et 8 % de la masse sèche du mélange.

#### 6.2.2.c Gonflement

Le gonflement linéaire mesuré lors de l'essai  $CBR_{3j+4j \text{ immersion}} < 1 \text{ mm}$ :  $LS_1$ .

[N6] | [N8], [N10]  
mode opératoire | classes

## 7 Exécution

Le traitement du sol est réalisé in situ (traitement du sol en place sans déplacement de celui-ci) ou en centrale de traitement (mobile ou fixe).

Les résultats de laboratoire ne garantissent pas les performances in situ. Celles-ci dépendent aussi de la bonne exécution du traitement et de la qualité du sol support.

Les différents agents de traitement sont:

- [N12] - la chaux de classe CL90Q selon la norme NBN EN 459 correspondant aux exigences de la [N10] PTV 459;
- [N11] - le ciment selon la norme NBN EN 197-1;
- le liant hydraulique routier selon les normes en projet prEN 13282-1, prEN 13282-2 et [N14] prEN 13282-3.

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

### 7.1 Traitement

#### **7.1.1 Traitement in situ**

##### *7.1.1.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  $\pm 10$  % de la valeur du dosage prescrit.

Vu l'objectif de traitement (stabilisation), le dosage en chaux déterminé en laboratoire doit être respecté et ne peut en aucun cas être diminué.

L'opération doit être menée de façon à réduire au maximum la production de poussière.

En cas de précipitations, l'épandage est arrêté.

#### *7.1.1.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 texture uniformes). L'épaisseur de la couche traitée est limitée par la performance du malaxeur (et du compacteur – voir aussi § 7.2).

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

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

### **7.1.2 Traitement en centrale**

#### *7.1.2.a Dosage, malaxage, stockage et chargement*

##### *Dosage*

L'installation de traitement 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.

Le dosage est défini d'après l'étude de formulation en laboratoire.

Vu l'objectif de traitement (stabilisation), le dosage en chaux déterminé en laboratoire doit être respecté et ne peut en aucun cas être diminué.

##### *Malaxage*

Le mélange doit être homogène à la sortie de l'installation, en couleur et texture.

### *Stockage*

Le sol traité au ciment ne peut pas être stocké.

Pour les LHR, la possibilité de conserver des stocks doit être vérifiée auprès du producteur et les conditions de stockage prévues doivent être respectées.

Le stockage du sol traité à la chaux dans des conditions favorables est autorisé: il convient d'assurer une fermeture adéquate du stock, afin de garantir un bon écoulement des eaux superficielles et afin d'éviter la stagnation de l'eau au pied des stocks.

### *Chargement*

La qualité du produit ne peut être endommagée lors du chargement. Il ne peut y avoir de formation de bloc.

Pour plus de détails concernant ce paragraphe, on peut se référer au TRA 16 de COPRO: *Sols traités [R8] sur site fixe*.

#### *7.1.2.b Mise en place du sol traité*

Avant la mise en place du sol traité, le *fond de coffre* doit être contrôlé. Le module de Westergaard initial ( $K_{wi}$ ), mesuré sur le sol naturel, doit être suffisant ( $K_{wi} > 30 \text{ MPa/m}$ ).

### 7.2 Compactage

Pour le compactage du sol traité, le nombre de passes du compacteur dépend du type de sol, de l'épaisseur de la couche et de la puissance de l'engin de compactage (§ 7.1.1.b avec la limitation de l'épaisseur de la couche pour la phase de malaxage).

Dans le cas des fondations haute performance, l'épaisseur de la couche doit être de minimum 30 cm après compactage de celle-ci.

Afin d'obtenir le degré de compactage et la portance exigés, il est recommandé de limiter l'épaisseur de la couche, après compactage, à 35 cm. Une épaisseur supérieure peut être appliquée si l'entreprise prouve que les moyens de compactage (et de malaxage, s'il s'agit d'un traitement in situ) permettent une épaisseur supérieure (limitée à 45 cm).

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

En cas d'utilisation de LHR, le délai de maniabilité doit être confirmé par le producteur.

En cas d'utilisation de chaux, si le sol est trop humide, il est conseillé, par temps sec, avant le compactage, de laisser le mélange exposé à l'air (généralement 1 à 3 h) pour favoriser l'évaporation de l'eau jusqu'à son humidité optimale. Cette durée d'aération sera également fonction de l'organisation du chantier. Si le sol est trop sec, il est conseillé d'humidifier le sol pour obtenir cette humidité optimale. En fin de journée, il est conseillé de fermer la surface en compactant au rouleau lisse ou au rouleau à pneus. L'évacuation des eaux pluviales doit être assurée par des mesures adéquates.

Le réglage définitif des couches de sol traité se fait par rabotage sur toute la surface à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses.

#### [R9] 7.3 Protection superficielle

##### **7.3.1 Traitement à la chaux**

Si pour des raisons d'organisation de chantier ou de conditions climatologiques, il n'est pas possible de poursuivre immédiatement les travaux de couches complémentaires de la structure routière, la surface du sol traité à la chaux doit être protégée contre les effets de l'humidification et d'assèchement. La protection consiste en l'application, au plus tard en fin de journée, d'une émulsion de bitume à raison de 0,7 l/m<sup>2</sup>, suivie éventuellement d'un sablage (sable C. 3.4.2, selon RW99) à raison de 3 kg/m<sup>2</sup>.

##### **7.3.2 Traitement au ciment ou LHR**

La protection contre la dessiccation des matériaux traités au ciment ou LHR s'effectue en deux phases:

- la première phase consiste en un arrosage modéré à l'eau (sans ruissellement) de la surface du matériau traité. Cet arrosage s'effectue immédiatement après le dernier passage du ou des engins de compactage;
- la seconde phase s'effectue au plus tard en fin de journée. Elle consiste en l'application:
  - d'une émulsion de bitume C60B1, à raison de 0,7 l/m<sup>2</sup>;
  - d'un épandage de sable, à raison de 3 kg/m<sup>2</sup>.

#### 7.4 Traficabilité et protection contre les sollicitations de trafic

Le délai à respecter pour circuler sur la couche traitée sera déterminé par les résultats des essais de laboratoire (voir chapitre 6 *Etude de formulation*).

Une attention particulière est demandée pour l'utilisation d'engins de manutention sur chenilles. Les chemins de déplacement (et surtout les zones de giration) de ces engins doivent être protégés par une couche granulaire d'une épaisseur suffisante ou par l'installation de plateaux en bois ou

métalliques temporaires, de manière à éviter l'endommagement de la couche de sol traité dont l'épaisseur minimale doit être garantie.

### 7.5 Conditions climatiques

#### **7.5.1 Traitement à la chaux**

En cas de vent fort, de pluie persistante ou lorsque la température du sol à traiter est inférieure à 4 °C, le traitement de sol est interrompu.

En cas de gel, les couches éventuellement décompactées lors du dégel sont recompactées au degré imposé; les matériaux éventuellement détrempés sont retraités.

#### **7.5.2 Traitement aux LHR**

Il est recommandé de ne pas traiter si la température est inférieure à 5 °C.

#### **7.5.3 Traitement au ciment**

La mise en œuvre est interdite lorsque la température de l'air mesurée sous abri, à 1,5 m du sol, est inférieure ou égale à 1 °C à 8 heures du matin ou inférieure ou égale à -3 °C durant la nuit.

### 7.6 Stockage du sol traité

#### **7.6.1 Traitement à la chaux**

Un sol traité à la chaux peut 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 une fermeture adéquate du stock afin de garantir un bon écoulement des eaux superficielles et afin d'éviter la stagnation de l'eau au pied des sols stockés.

Au moment de la réutilisation, il convient de contrôler la teneur en eau. Si nécessaire, un traitement complémentaire doit être envisagé pour obtenir la teneur en eau adéquate déterminée en phase de projet (voir aussi § 7.1.2.a).

#### **7.6.2 Traitement aux LHR ou au ciment**

Le stockage des sols traités aux LHR doit respecter les conditions et les délais établis par le producteur (voir aussi § 7.1.2.a).

Le sol traité au ciment ne peut pas être stocké.

## 8 Contrôles

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

### 8.1 Mesure du module de Westergaard initial (Kwi)

[N16] Le module de Westergaard initial est mesuré par un essai à la plaque de Westergaard. Si le critère est respecté ( $K_{wi} > 30 \text{ MPa/m}$ ), le traitement du sol peut être envisagé en une seule couche, soit pour une fondation courante, soit pour une fondation à haute performance.

### 8.2 Contrôle du produit utilisé (agent de traitement ou sol traité en centrale)

*Au moment de la livraison:* vérification des bons de livraisons, des marques de certification (COPRO, 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

[N13] vérification des paramètres (voir cahier des charges et normes en vigueur).

*Après stockage:* pour la chaux: avant réutilisation: vérification de la réactivité t60 et la teneur en CaO disponible (voir cahiers des charges).

### 8.3 Contrôle de l'exécution

Le *contrôle de l'épandage* se fait ponctuellement par le pesage d'une bêche de 0,5 m<sup>2</sup> 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 prélevé dans la couche non compactée.

[N1]

L'*épaisseur de la couche* après compactage est vérifiée par des sondages dans la couche traitée.

L'essai Panda permet également de détecter la différence de résistance entre la couche traitée et le sol naturel. En cas de doute, une solution de phénolphtaléine peut indiquer la transition entre le sol

[R5] traité et non traité.

Le cas échéant:

*Contrôles du malaxage*<sup>(14)</sup>: le malaxage peut être contrôlé par divers essais.

[R1]

*profondeur de malaxage,  
homogénéité du mélange*

Il est également possible de mesurer la mouture du sol traité par le degré de pulvérisation.

[N7] | [N8], [N9], [N10]  
*mode opératoire* | *classes*

#### 8.4 Contrôle de réception

[N16] Essai à la plaque de Westergaard: critère et délai après compactage.

##### 8.4.1 Pour un traitement à la chaux

*Pour les fondations courantes*

Le module de Westergaard (Kw), mesuré minimum 24 h après compactage, doit être supérieur au critère fixé par le cahier spécial des charges (minimum 40 MPa/m).

*Pour les fondations à haute performance*

Le module de Westergaard (Kw), mesuré minimum 24 h après compactage, doit être supérieur au critère fixé par le cahier spécial des charges (minimum 50 MPa/m).

##### 8.4.2 Pour un traitement aux LHR (ou au ciment)

Le délai minimum nécessaire entre le compactage et l'essai à la plaque de Westergaard est idéalement à préciser par le fournisseur. Ce délai sera évalué sur base de la formulation, des conditions climatiques et de l'expérience (chantiers locaux, planche d'essai, etc.). Ce délai permet également de définir l'âge à partir duquel la plate-forme peut-être ouverte à la circulation de chantier.

En fonction du phasage des travaux, il sera utile d'envisager des solutions alternatives pour réduire au maximum le délai entre la fin de la mise en œuvre de la plate-forme et la mise en œuvre de la fondation industrielle (optimisation de dosage par exemple).

*Pour les fondations courantes*

Le module de Westergaard (Kw) est mesuré minimum 24 h après compactage, et doit être supérieur au critère fixé par le cahier spécial des charges (minimum 40 MPa/m).

*Pour les fondations à haute performance*

Sans précisions apportées par le fournisseur, le module de Westergaard (Kw) est mesuré normalement dans un délai de minimum 7 jours après compactage.

Ce délai peut-être réduit à 72 heures dans les conditions optimales de maturation soit des températures nocturnes sous abris > 10 °C.

Ce délai peut être prolongé jusqu'à 28 jours dans des conditions de mise en œuvre hivernale soit température nocturne < 8 °C.

Le module doit être supérieur au critère fixé par le cahier spécial des charges (minimum 50 MPa/m).

#### 8.5 Planche d'essai<sup>(15)</sup>

[N16] Essai à la plaque de Westergaard sur une zone de test, mesuré après le délai adéquat.

# A1 Annexe 1

## Aptitude des différents liants à traiter les sols en fonction des types de sol

	Fondation courante			Fondation à haute performance			
	Chaux	Ciment	LHR	Chaux	Ciment	LHR	Mixte
Limons et argiles peu plastiques	✓	✓	✓		✓	✓	
Limons et argiles	✓		✓	✓		✓	✓
Argiles très plastiques	✓		✓	✓		✓	✓
Sables et graves limoneux	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Sables et graves argileux à très argileux	✓		✓	✓		✓	✓
Sables et graves insensibles à l'eau		✓	✓		✓	✓	
Graves ou sables grossiers argileux	✓	✓	✓		✓	✓	
Sables argileux	✓	✓	✓		✓	✓	
Matériaux pierreux contenant peu de fines	Pas de traitement si portance suffisante				✓	✓	
Matériaux pierreux à horizon argileux	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Matériaux pierreux à horizon sablo-limoneux	Pas de traitement si portance suffisante				✓	✓	
Sol fin argileux à charge pierreuse	✓		✓	✓		✓	✓
Sol fin limoneux à charge pierreuse	✓	✓	✓		✓	✓	
Sol fin argileux à faible charge pierreuse	✓		✓			✓	✓
Sol fin sableux, limoneux ou peu argileux à faible charge pierreuse	✓		✓		✓	✓	

*Remarque:* le choix du liant hydraulique routier est fonction de la nature du sol à traiter.

## N Normes

- [N1] **NBN EN 1097-5 (2008)**  
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats  
Partie 5: Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée
- [N2] **NBN EN 1744-1, §15 (1998)**  
Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats  
Partie 1: Analyse chimique
- [N3] **NBN EN 933-9 (1999)**  
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats  
Partie 9: Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène
- [N4] **NBN EN 13286-2 (2004)**  
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques  
Partie 2: Méthode d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et la teneur en eau – Compactage Proctor
- [N5] **NBN EN 13286-41 (2003)**  
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques  
Partie 41: Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques
- [N6] **NBN EN 13286-47 (2004)**  
Mélanges non traités et mélanges à la base de liant hydraulique  
Partie 47: Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice (de) portance immédiate (IPI) et du gonflement
- [N7] **NBN EN 13286-48 (2005)**  
Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques  
Partie 48: Méthode d'essai pour la détermination du degré de pulvérisation
- [N8] **NBN EN 14227-10 (2006)**  
Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications  
Partie 10: Sol traité au ciment
- [N9] **NBN EN 14227-11 (2006)**  
Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications  
Partie 11: Sol traité à la chaux

- [N10] **NBN EN 14227-13 (2006)**  
Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications  
Partie 13: Sol traité au liant hydraulique routier
- [N11] **NBN EN 197-1 (2000)**  
Ciment  
Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- [N12] **NBN EN 459-1 (2002)**  
Chaux de construction  
Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité
- [N13] **NBN EN 459-2 (2002)**  
Chaux de construction  
Partie 2: Méthode(s) d'essai
- [N14] **prEN 13282-1 (2009)**  
Hydraulic road binders  
Part 1: Composition, specifications and conformity criteria of rapid hardening hydraulic road binders  
**prEN 13282-2 (2009)**  
Hydraulic road binders  
Part 2: Composition, specifications and conformity criteria of normal hardening hydraulic road binders  
**prEN 13282-3 (2009)**  
Hydraulic road binders  
Part 3: Conformity evaluation
- [N15] **NBN EN ISO 14688-1 (2002)**  
Recherches et essais géotechniques: identification et classification des sols  
Partie 1: identification et description
- [N16] **NF P94 117-3 (2008)**  
Sols: Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes  
Partie 3: Coefficient de réaction de Westergaard sous chargement statique d'une plaque
- [N17] **NBN EN 933-1 (1997)**  
Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats  
Partie 1: Détermination de la gravité – Analyse granulométrique par tamisage

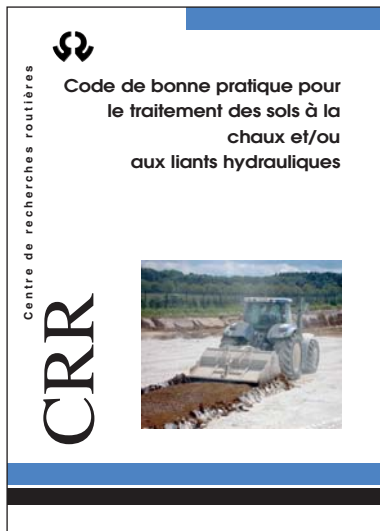
## R Références

- [R1] **R81/10 : 2010 : CRR**  
Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
- [R2] **NIT x : CSTC**  
Dimensionnement des sols industriels sur terre-plein (*en projet*)
- [R3] **NIT 204 : 1997 : CSTC**  
Sols industriels à base de ciment
- [R4] **MF 40/78 : 1978 : CRR**  
Mode opératoire : Essai de chargement à la plaque pour le contrôle du compactage
- [R5] **Complément au R81/10 : 2010 : CRR**  
Guide pratique 2 : Stabilisation des sols pour les couches de sous-fondation
- [R6] **Complément au R81/10 : 2010 : CRR**  
Guide pratique 3 : Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre
- [R7] **LCPC-SETRA : 1992**  
Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme –  
Fascicule II: Annexes techniques
- [R8] **TRA 16 version 2.0 : 2007 : COPRO**  
Règlement d'application pour sol traité aux liants et produits sur site fixe
- [R9] **LCPC-SETRA : 2007**  
Guide technique : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques –  
Application à la réalisation des assises de chaussées
- [R10] **PTV 459 : 2005 : CRIC**  
Chaux vive pour traitement des sols

Dépôt légal: D/2009/0690/13

ISSN 1376-9340





## **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

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