

# HYDROGEOTECHNIQUE

*LABORATOIRES REGIONAUX DE RECONNAISSANCE ET D'INGENIERIE  
DE L'EAU, DES SOLS, DES FONDATIONS ET DE L'ENVIRONNEMENT*

TRAITEMENT DES SOLS ET DES ROCHES (2013)

## ACTIONS SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

ENTPE 2013

## ACTIONS SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CIMIQUES

### Spécifiques aux sols:

#### Un sol :

=> un squelette,

=> une matrice.

#### Actions sur le squelette :

=> corrections granulométriques

#### Actions sur la matrice :

=> traitement à la chaux,

=> traitement aux liants hydrauliques.

## Traitements des sols:

**On analysera ici :**

**1.1) Le traitement à la chaux**

**1.2) Le traitement aux liants hydrauliques**

## Objectif du Traitement des sols:

**Deux objectifs principaux :**

**1. Réemploi en remblai de certains sols non réutilisables en raison de leur état hydrique.**

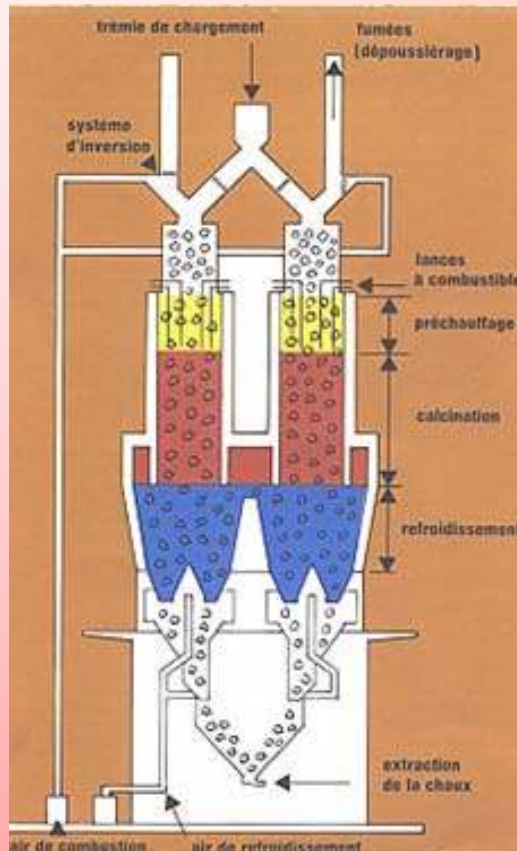
**2. Technique spécifique pour élaborer à partir de sols, un matériau adapté pour la réalisation de couche de forme:**

**a) on cherche un effet rapide, efficace et durable,**

**b) on cherche des performances mécaniques, la tenue à l'eau et au gel**

## Fabrication de la chaux:

La chaux aérienne est obtenue par décarbonatation du calcaire à une température de 900°C



**La chaux aérienne existe sous trois forme:**

- **la chaux vive,**
- **la chaux éteinte (chaux vive + eau),**
- **le lait de chaux (chaux éteinte + eau)**

**La caractéristiques principales sont:**

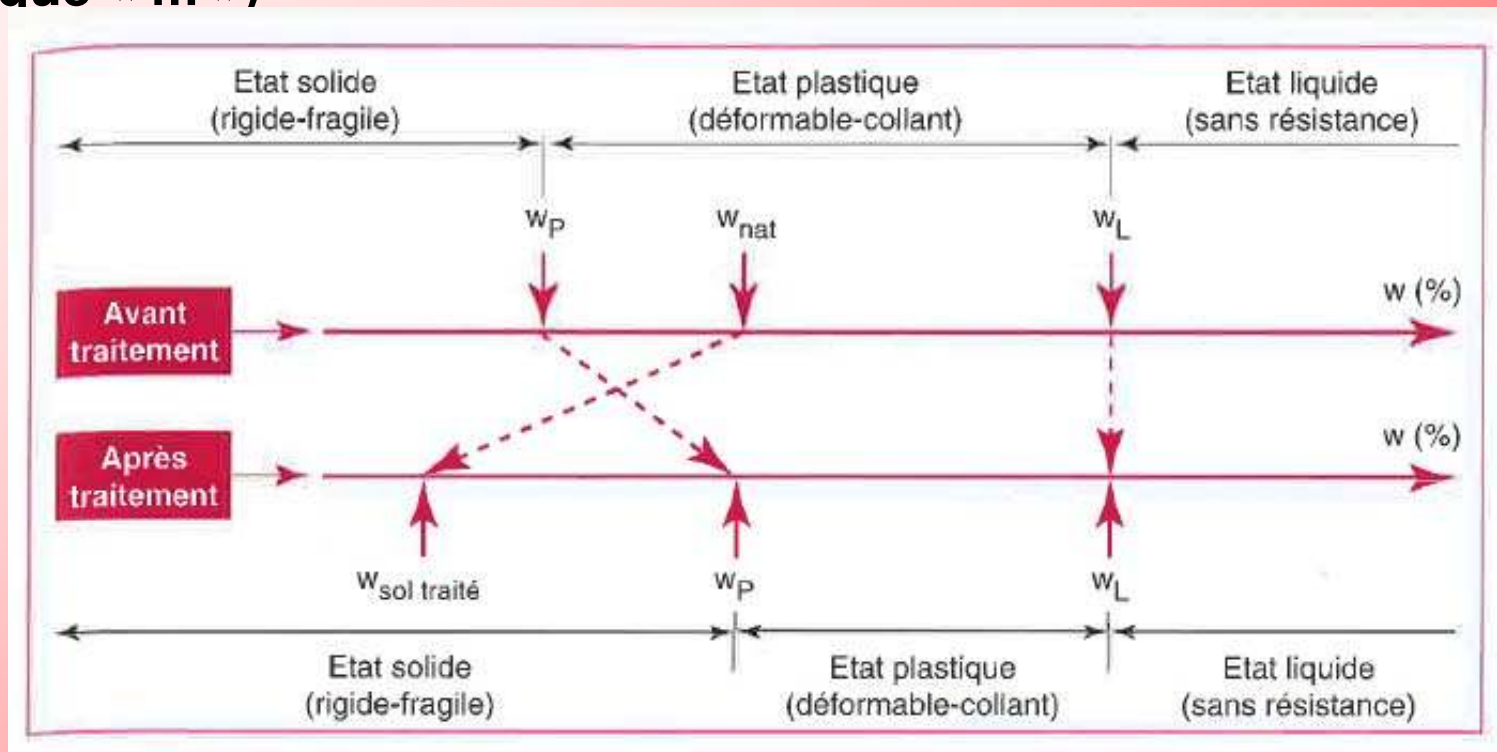
- **la teneur en chaux libre,**
- **la granularité (passants à 0.08mm, 0.2mm et 2mm)**
- **la réactivité: elle représente la vitesse d'hydratation de la chaux**

**Norme NFP 98-101: fixe les spécifications relatives aux chaux vives**

## 1.1 Traitement à la chaux

Les effets de la chaux sont:

Diminution de la teneur en eau: (ramener les matériaux à un état hydrique « m »)



## Les matériaux traitables sont:

- **Matériaux fins (A1, A2)**
- **$D_{\max} < 50\text{mm}$  (sinon problème de malaxage)**
- **État hydrique « h »**
- **Sans matière organique**
- **Si matériaux charpentés (C1A, C1B, C2A, C2B), prévoir une élimination des gros éléments**



## Les performances à rechercher sont définies dans le GTS:

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)							
	A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> A <sub>1</sub> *	A <sub>2</sub> B <sub>5</sub> C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> * C <sub>1</sub> B <sub>5</sub> C <sub>2</sub> B <sub>5</sub> R <sub>34</sub>	A <sub>3</sub> C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub> A <sub>3</sub> *	B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub> B <sub>4</sub> *	B <sub>2</sub> B <sub>5</sub> C <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> B <sub>2</sub> * C <sub>1</sub> B <sub>5</sub> C <sub>2</sub> B <sub>5</sub> *	R <sub>12</sub> ☉	R <sub>13</sub> ☉	F <sub>2</sub>
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.)

☉ 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.)

## Traitement à la chaux: Méthodologie d'exécution

### 1) Stockage:

En silo afin d'éviter tout risque  
de pollution



### 2) Épandage de la chaux:

Attention aux poussières en  
présence de vent



## Traitement à la chaux: Méthodologie d'exécution

### 3) Malaxage par outils fixes:

**Charrue à disques: profondeur  
de malaxage 0.20m**



**Charrue à socs: profondeur  
de malaxage 0.70m**



## Traitement à la chaux: Méthodologie d'exécution

### 3) Malaxage par outils animés:

**Rotobêche: profondeur  
de malaxage 0.30m**



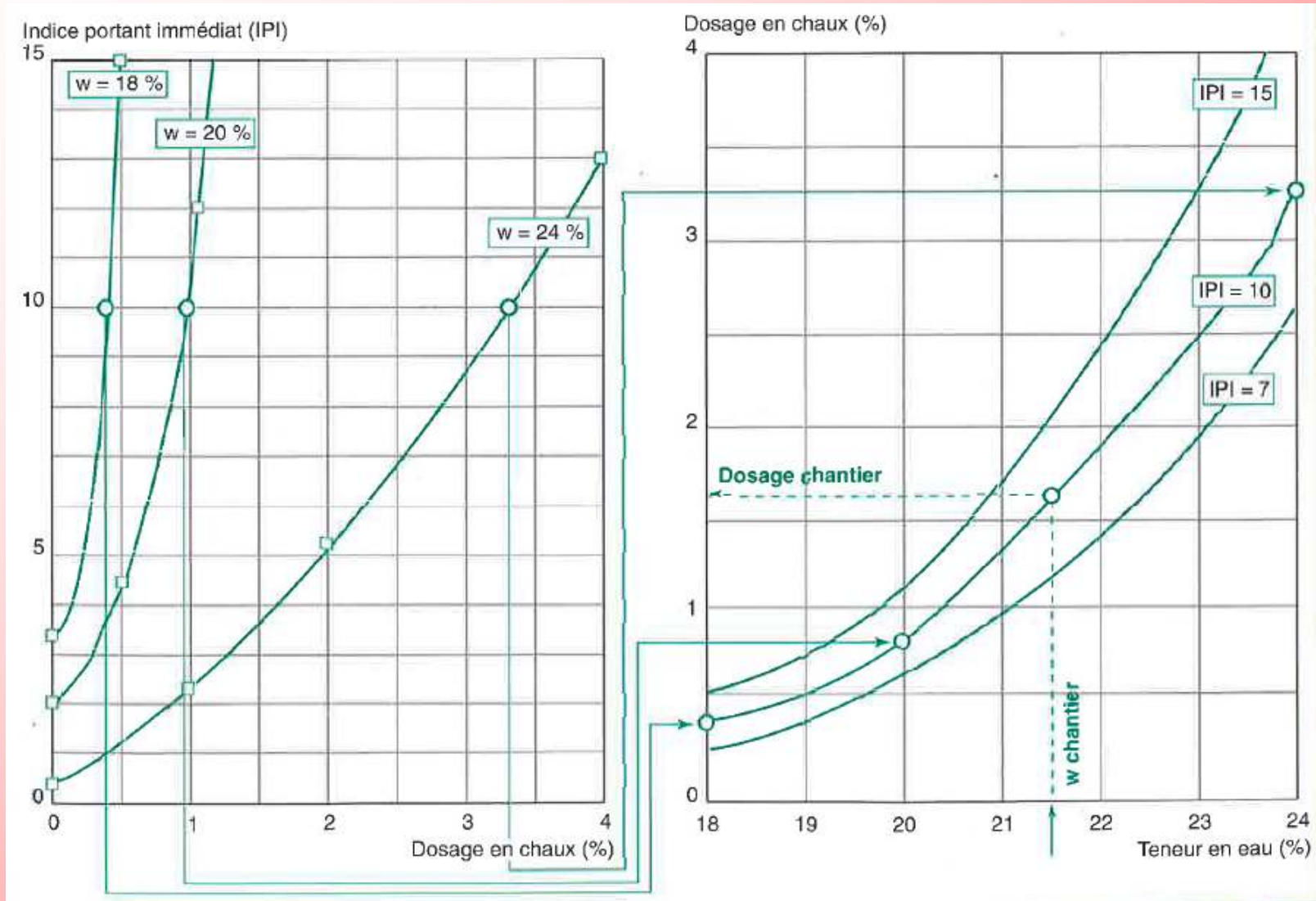
**Pulvérisateur: profondeur  
de malaxage 0.50m**



## Traitement à la chaux: Pourcentage de chaux à mettre en oeuvre

Classes de sols	Modalités de traitement
$A_1$ *, $B_5$ * $C_1A_1$ *, $C_1B_5$ * $C_2A_1$ *, $C_2B_5$ *	1 % CaO + 7 % $C_{32,5}$
$A_2$ , $B_6$ $C_1A_2$ , $C_1B_6$ $C_2A_2$ , $C_2B_6$	1,5 % CaO + 7 % $C_{32,5}$
$A_3$ , $C_1A_3$ , $C_2A_3$	2 % CaO + 7 % $C_{32,5}$ ou 6 % CaO
$B_1$ , $B_2$ , $D_1$ $C_1B_1$ , $C_1B_2$	6 % $C_{32,5}$ + correcteur éventuel ☉
$B_3$ , $B_4$ , $D_2$ , $D_3$ $C_1B_3$ , $C_1B_4$ $C_2B_3$ , $C_2B_4$	5 % $C_{32,5}$

### Exemple de présentation des résultats



## Traitement à la chaux: Recommandations

- 1) **Faire des analyses chimiques: teneur en matière organique, teneur en phosphates et nitrates, sulfates, chlorures et sulfures**
- 2) **Faire des essais d'aptitude au traitement avant de réaliser des études de traitement (immersion 7j):**

Type de traitement	Aptitude du sol	Paramètre considéré Gonflement volumique $G_v$ (%)
Traitement à la chaux seule	Adapté	$\leq 5$
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$
	Inadapté	$\geq 10$

- 3) **Attention: Augmentation des caractéristiques en fonction du temps**

## Traitement à la chaux: Contrôle (Mission G4)

- 1) **Planches d'essais au démarrage du chantier,**
- 2) **Réalisation d'essais en laboratoire (GTR),**
- 3) **Réalisation d'essais à la plaque,**
- 4) **Contrôle des quantités de chaux (essais à la bêche),**
- 5) **En remblais: objectif de densification  $q_4$  ( $>95\% \rho_d$  OPN)**



## 1.2 Traitement aux liants hydrauliques

**Les matériaux traitables sont:**

- **Matériaux fins (A1, A2)**
- **$D_{\max} < 50\text{mm}$  (sinon problème de malaxage)**
- **État hydrique « h »**
- **Sans matière organique**
- **Si matériaux charpentés (C1A, C1B, C2A, C2B), prévoir une élimination des gros éléments**

## **Les liants couramment utilisés sont:**

- **Ciment PORTLAND COMPOSE CPJ/CEMII/32.5**
- **Mélange (liants routiers)**

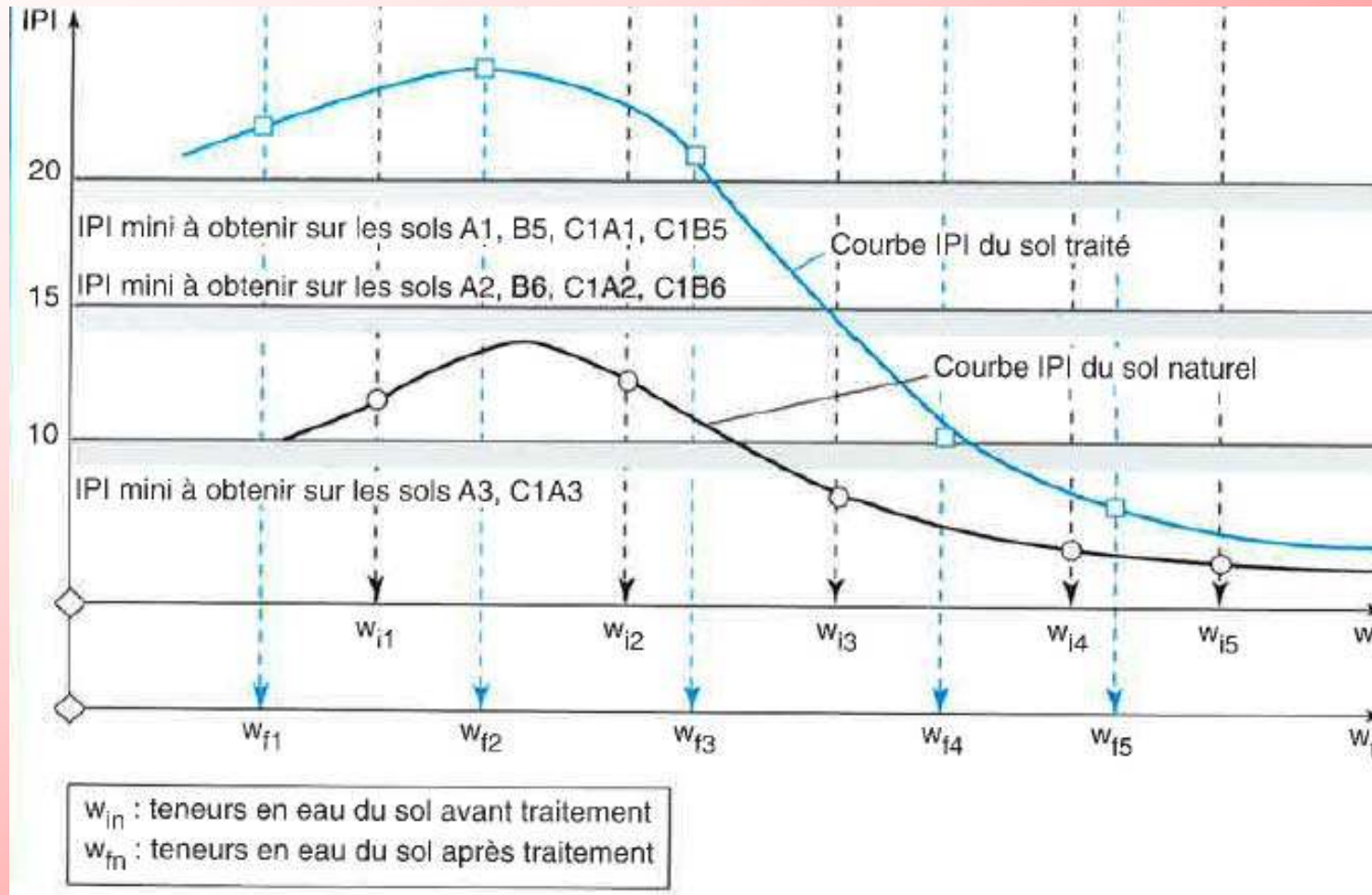
**ROLAC**

**ROCSOL**

**ROCTR**

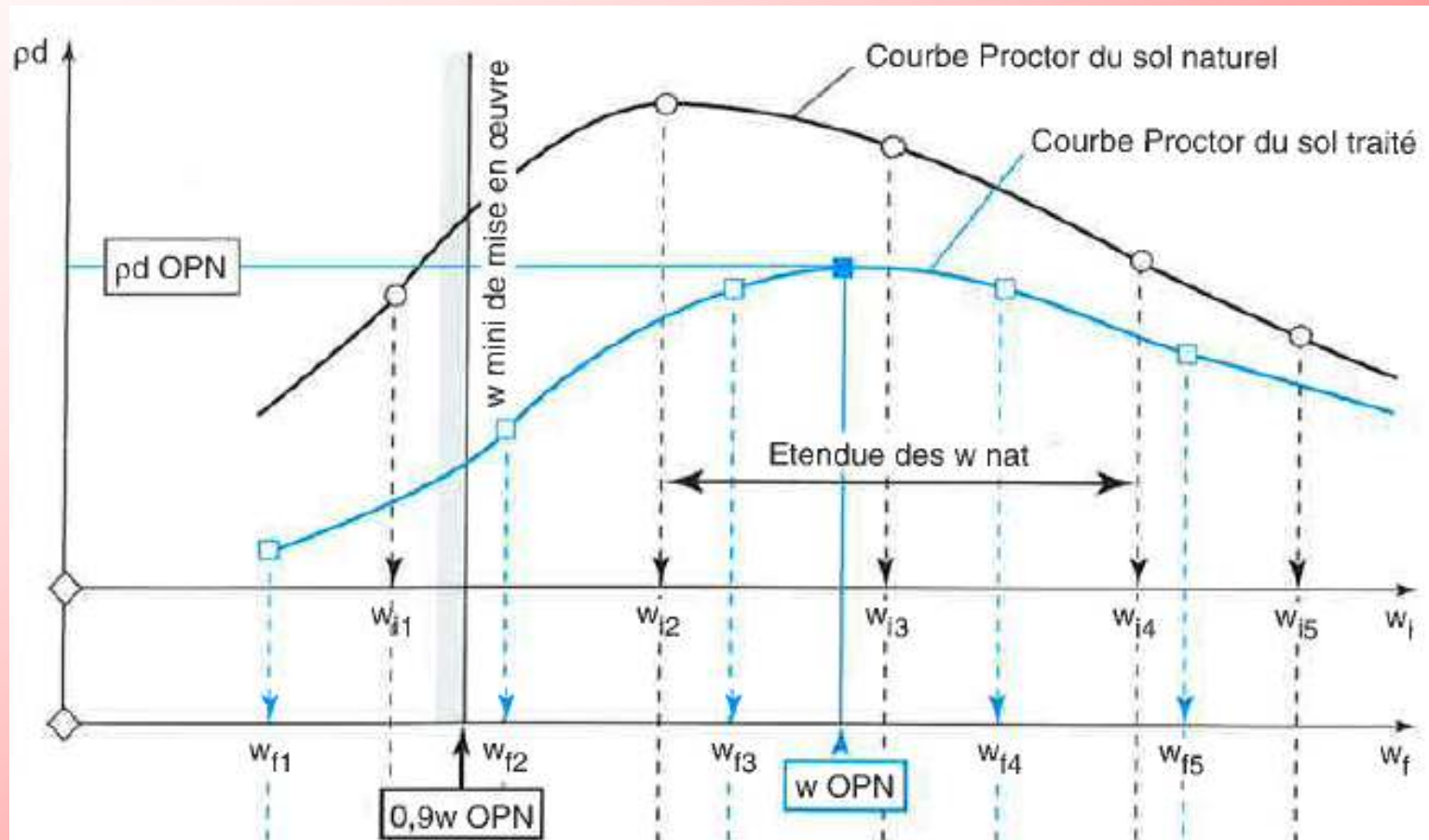
## Les effets du traitement des sols aux liants sont:

### 1) Augmentation de la résistance au cisaillement du sol



Les effets du traitement des sols aux liants sont:

2) Modification des caractéristiques de compactage



## Les performances à rechercher sont définies dans le GTS:

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 : $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,80 \text{ ☉}$ (lorsque la $VB_s$ du sol est $\leq 0,5$ ) ou $\frac{R_{ci}}{R_{c60}} \geq 0,60 \text{ ☉}$ (lorsque la $VB_s$ du sol est $> 0,5$ )
Résistance au gel	$R_t$ ou $R_{tg}$ 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 $R_{tg}$ à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel est supérieure à 0,25 MPa [13] ◆

## Traitement aux liants: Méthodologie d'exécution

### 1) Stockage:

En silo afin d'éviter tout risque  
de pollution



### 2) Épandage du liant:

Utilisation d'épandeurs précis

Attention aux poussières en  
présence de vent



## Traitement aux liants: Méthodologie d'exécution

Malaxage par pulvérisateur à arbre  
Horizontal: permet une meilleure  
qualité de mélange (mouture)



Préréglage: à l'aide d'une niveleuse

Réglage: à l'aide d'une raboteuse  
guidée par GPS

Couche de forme: objectif de  
densification:  $q_3 (>98.5\% \rho_d \text{ OPN})$



## Traitement aux liants: Pourcentage à mettre en oeuvre

Classes de sols	Modalités de traitement
$A_1$ *, $B_5$ * $C_1A_1$ *, $C_1B_5$ * $C_2A_1$ *, $C_2B_5$ *	1 % CaO + 7 % $C_{32,5}$
$A_2$ , $B_6$ $C_1A_2$ , $C_1B_6$ $C_2A_2$ , $C_2B_6$	1,5 % CaO + 7 % $C_{32,5}$
$A_3$ , $C_1A_3$ , $C_2A_3$	2 % CaO + 7 % $C_{32,5}$ ou 6 % CaO
$B_1$ , $B_2$ , $D_1$ $C_1B_1$ , $C_1B_2$	6 % $C_{32,5}$ + correcteur éventuel ☉
$B_3$ , $B_4$ , $D_2$ , $D_3$ $C_1B_3$ , $C_1B_4$ $C_2B_3$ , $C_2B_4$	5 % $C_{32,5}$



## Traitement à la chaux: Recommandations

- 1) **Faire des analyses chimiques: teneur en matière organique, teneur en phosphates et nitrates, sulfates, chlorures et sulfures**
- 2) **Faire des essais d'aptitude au traitement avant de réaliser des études de traitement (immersion 7j):**

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	$\leq 5$	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq G_v \leq 10$	$0,1 \leq R_{td} \leq 0,2$
	Inadapté	$\geq 10$	$\leq 0,1$

- 3) **Attention: Augmentation des caractéristiques en fonction du temps**

## Traitement à la chaux: Recommandations

- 4) **Prévoir une protection en surface (enduit superficiel) afin de maintenir l'état hydrique du sol traité et assurer un accrochage avec la structure de chaussée**
  
- 5) **Augmentation des caractéristiques mécaniques:**
  - **raidir des pentes de talus,**
  - **diminuer les efforts de poussée sur les ouvrages de soutènement.**

## Traitement aux liants: Contrôle (Mission G4)

- 1) **Planches d'essais au démarrage du chantier,**
- 2) **Réalisation d'essais en laboratoire (GTR),**
- 3) **Réalisation d'essais à la plaque,**
- 4) **Contrôle des quantités de liant (essais à la bêche),**
- 5) **Essais de compression simple, résistance à la traction et détermination du module d'Young**
- 6) **En couche de forme: objectif de densification  $q_3$  ( $>98.5\% \rho_d$  OPN)**