

المعالجة الكيميائية للتربة

Chemical treatment of soils

Traitement chimique des sols

Méthodes d'amélioration et de renforcement des sols

- **Amélioration de la masse du sol**
 - consolidation et drainage
 - préchargement par remblai ou par le vide
 - Injections
 - Vibrocompactage
 - compactage dynamique
 - compactage statique
 - explosifs (*électroconsolidation, congélation*)
- **Amélioration par inclusions (renforcement)**
 - colonnes ballastées
 - inclusions rigides
 - colonnes de mortier sol-ciment réalisées par jet
 - colonnes de sol-chaux-ciment réalisées par malaxage
- **Renforcement des sols**
 - remblais en sol renforcé (Terre Armée, géotextiles, géogrilles)
 - Clouage
- **Traitement chimique des sols**
 - Chaux
 - ciment

Partie A

Traitement chimique



(a) épandeur/tombereau articulé



(b) pulvérisateur



(c) engins ardoisiers, avec citernes articulées sur tracteur, équipés d'un distributeur en service

Partie A

Traitement chimique

- *Matériaux*
- *Action des produits de traitement sur les sols*
- *Méthodologie d'étude*
- *Matériels de traitement*

Définition de traitement

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles.

- Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme.







© 2011 PHOTOFEST





➤ Avantages

Techniques

- Obtenir une couche traitée homogène, durable et stable
- Assurer une bonne répartition des charges
- Réduire les déformations sous dues charges d'exploitation et climatique

Economiques

- Réutiliser les matériaux en place
- L'absence du transport
- Réduction du cout

Ecologiques

- Economie d'énergie
- Réduction des matériaux à mettre en décharge
- Rationalisation de l'emploi de granulats naturels

Matériaux

Le sol

- ❖ Avant de traiter un sol et de l'utiliser comme matériau de construction, il est indispensable de connaître les principes généraux régissant son comportement.

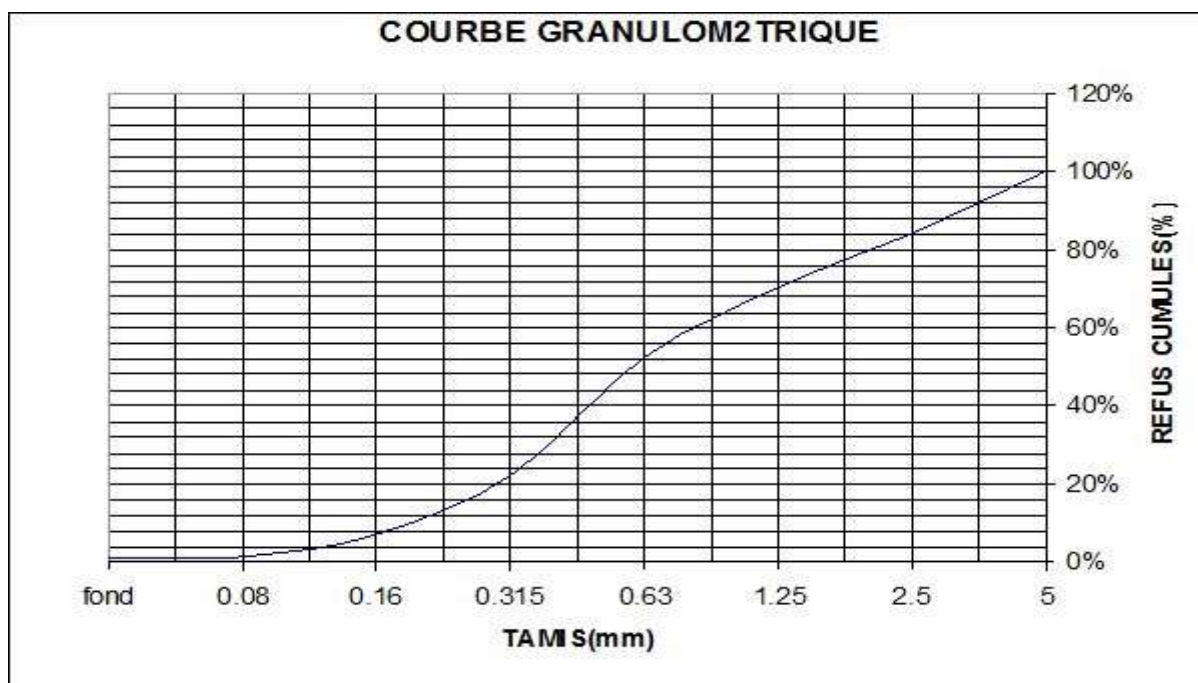
Matériaux

Le sol

1. Granularité (Dmax, Tamisâts à 0,08 mm, Cu)
2. Argilosité (Ip, VBS)
3. Teneurs en constituants chimiques (matières organiques, les phosphates, les nitrates, les chlorures, les sulfates, les sulfures)
4. *L'état hydrique (ω_n/w_{opt} , IPI, Ic)*
5. *L'état de compacité*

Matériaux - Le sol_Granularité (Dmax, Tamisats à 0,08 mm, Cu)

- Le **Dmax**: dimension du plus gros élément présent à moins de 1 % dans le sol. Il détermine les possibilités pratiques du traitement. Il se détermine par une inspection visuelle. L'analyse granulométrique complète peut donner des informations supplémentaires
- Le **tamisât à 80 μm** : cette caractéristique, exprime la finesse du matériau et oriente en grande partie le choix du produit du traitement, ainsi qu'il permet d'évaluer la sensibilité en eau du sol.
- Le **coefficient d'uniformité Cu** : cette caractéristique fournit une information qualitative sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre le niveau de résistance visé.

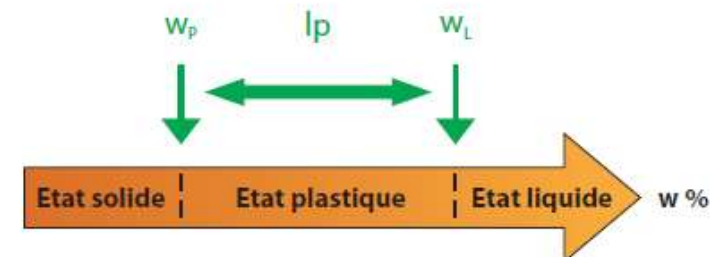
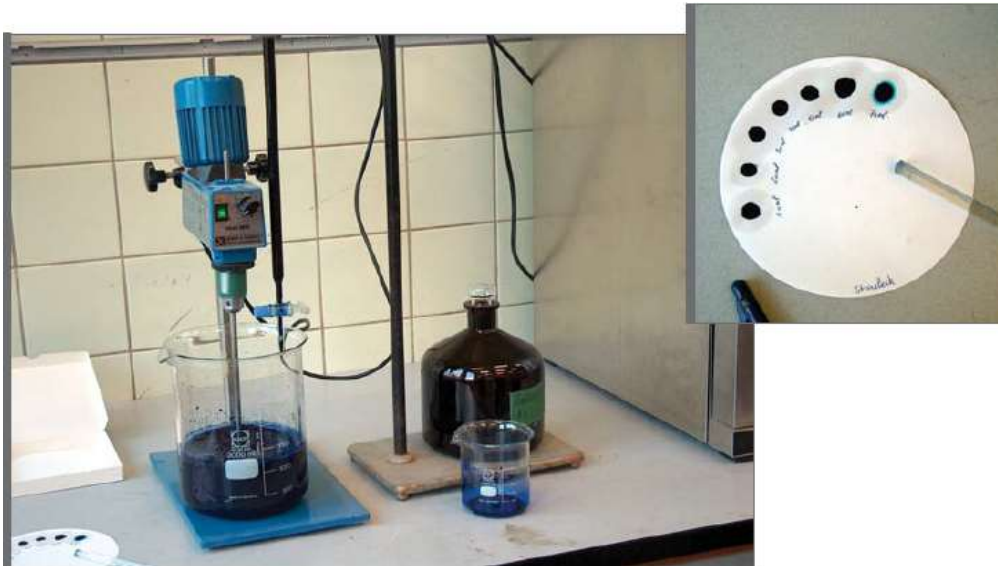


Matériaux

Le sol_Argilosité (I_p , VBS)

L'argilosité intervient dans le type d'application à envisager, dans le choix du produit de traitement, et dans les conditions de réalisation du mélange. A première vue, on peut considérer que plus l'argilosité n'est élevée, plus la chaux ne s'impose au choix des liants hydrauliques. Elle s'exprime par l'une des paramètres suivants:

- ❑ l'indice de plasticité I_p
- ❑ la valeur au bleu de méthylène du sol Vbs.



Matériaux

Le sol_ Composition chimique

La présence de certaines substances peut avoir un effet négatif sur l'efficacité de l'agent de traitement:

- **matières organiques**: elles peuvent retarder ou annuler l'effet du traitement en consommant une quantité plus ou moins grande de l'agent de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu. Les matières organiques sont surtout présentes en surface. Si la teneur en matières organiques d'un sol est supérieure à 3 %, une étude spécifique doit être réalisée pour estimer les effets des matières organiques sur le traitement (réf. 16);
- **sulfates** (gypse, plâtre), **sulfures** (pyrites): ils peuvent entraîner des gonflements par formation d'ettringite (espèce cristalline très gonflante). Leur présence dans le sol est susceptible d'entraîner une instabilité volumique en milieu humide et la destruction de la prise hydraulique. On admet couramment dans la littérature technique qu'au-delà d'une teneur en sulfates de l'ordre de 1 % on risque de rencontrer des problèmes de gonflement (réf. 34);
- **phosphates, nitrates** (engrais): ils inhibent ou retardent la prise hydraulique;
- **chlorures** (sel de gemme): ils accélèrent la prise et le durcissement avec possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates.

Matériaux

Le sol_ L'état hydrique (w_{nat}/w_{opt} , IPI, Ic)

La teneur en eau (w) d'un sol représente la masse d'eau contenue dans ce sol. Elle varie selon sa nature, sa position, la profondeur ainsi qu'au cours du temps.

$$w = 100 \times \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Pour caractériser l'état hydrique du sol (à l'extraction), la détermination de la teneur en eau naturelle seule est insuffisante, on utilise les paramètres suivants:

- le **rapport w_{nat}/w_{OPN}** (teneur en eau naturelle/teneur en eau à l'optimum Proctor normal du sol considéré). L'essai Proctor est décrit au chapitre I.3.3.1.c *Essais Proctor*; 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. Ce paramètre traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. L'IPI exprime la valeur de l'indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle. L'essai de détermination de l'IPI est décrit au chapitre I.3.3.1.e *Essais IPI*; ce paramètre est le mieux adapté pour caractériser les états hydriques «humides» et «très humides».
- l'**indice de consistance (Ic)**. Il permet de caractériser la consistance d'un sol:

$$Ic = \frac{w_L - w_{nat}}{w_L - w_p}$$



Presse



Balance
électronique



Etuve 200 L



Moule CBR et dames Proctor
(+ensemble des accessoires)

Matériaux

Les produits de traitement

- **La chaux aérienne:** Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire ($\text{CO}_3 \text{ Ca}$) à une température d'environ 900°C suivant la réaction :



Matériaux

Les produits de traitement

✓ Les liants hydrauliques

1. *Les ciments*
2. *Les liants spéciaux routiers (LSR)(ou liants hydrauliques routiers LHR)*

Action des produits de traitement sur les sois

A-Chaux

Actions immédiates

- se produisent dès l'instant où le mélange sol-chaux est constitué

Action à long terme

- qui se poursuivent durant plusieurs mois, voire plusieurs années après la mise en oeuvre du sol traité

Action des produits de traitement sur les sois

A-Chaux

1. Action immédiate

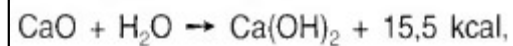
➤ Modifications de l'état hydrique

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 :

1. *hydratation de la chaux vive selon la réaction :*



2. *vaporisation d'une certaine quantité d'eau produite par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive,*
3. *apport de matière sèche (chaux éteinte) qui réduit le rapport :*

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

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.

- **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.

Action des produits de traitement sur les sols

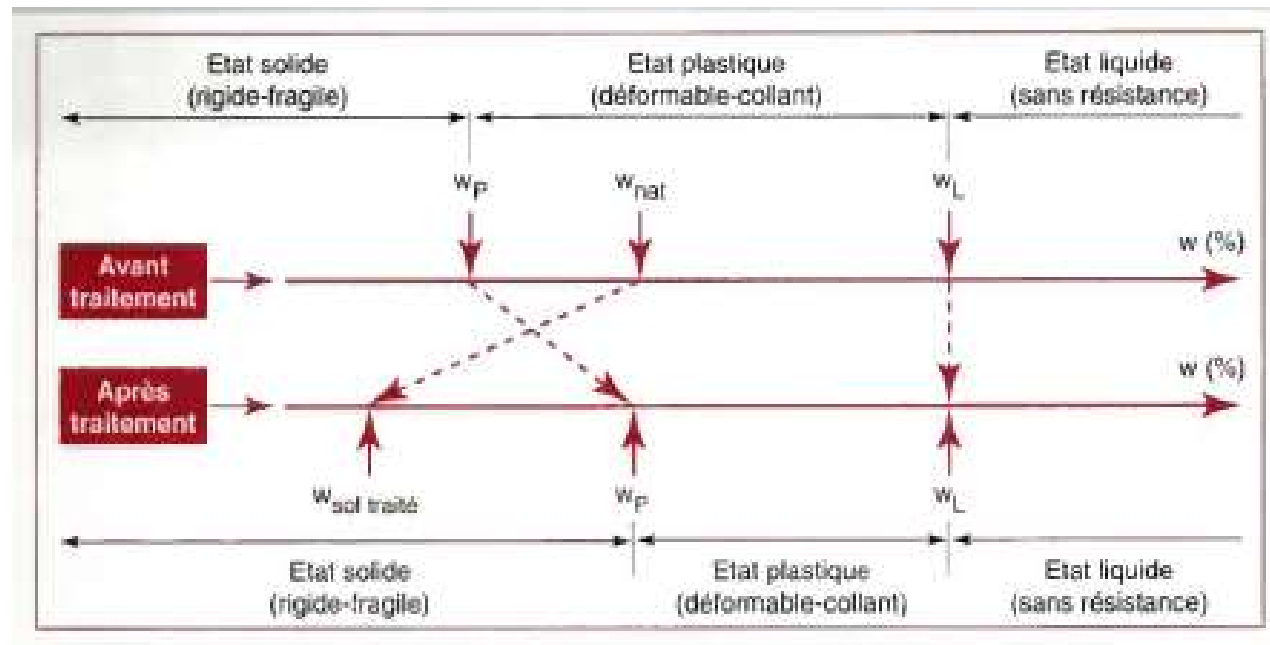
A-Chaux

➤. Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

- Une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification concomitante significative de sa limite de liquidité
- Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol
- Une modification des caractéristiques de compactage du sol

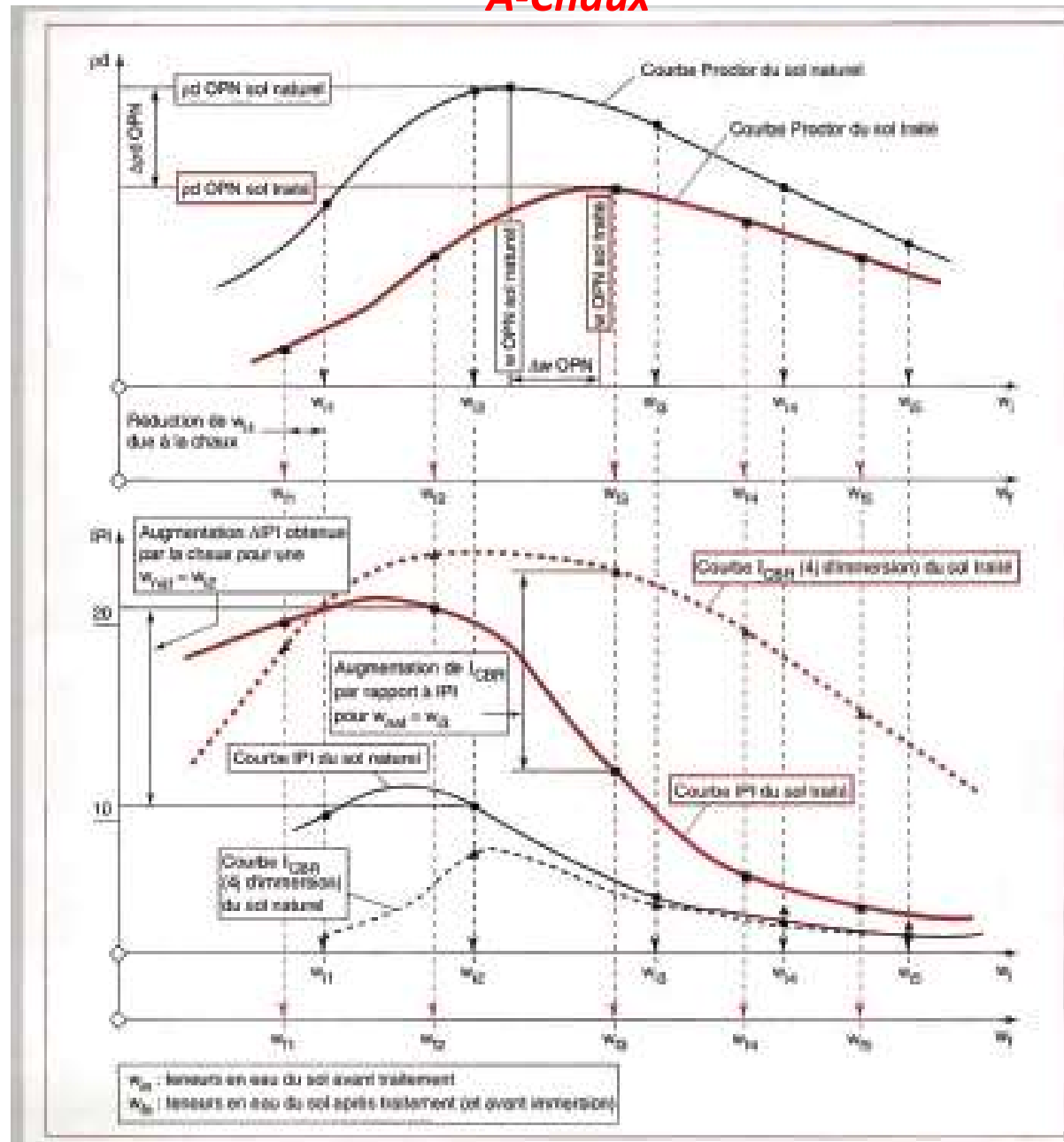
Action des produits de traitement sur les sois

A-Chaux



Action des produits de traitement sur les sois

A-Chaux



Action de la chaux les sols

1. Action à long terme

Action pouzzolanique

Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol, lorsque leur proportion est significative (ip mesurable ou VBg > 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 température du milieu

Plusieurs études ont montré l'importance de ce facteur, 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 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).

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.

Actions des liants hydrauliques

Action des liants hydrauliques

□• 2.2.1. Actions immédiates

1. 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.

1. 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.

□• 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.

1. **La première étape est celle du démarrage de la prise:** 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.
2. **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.

Différents niveaux à considérer dans l'établissement d'un programme d'étude de traitement

N	Objectifs	Indications	Stade du Projet
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	Etude préliminaire
1	Confirmer la faisabilité du traitement Fournir les éléments Aboutissant au pré-dimensionnement 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 rétablissement 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	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	Etude 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	Ce niveau d'étude peut être engagé à l'un ou l'autre des stades d'avancement de l'étude ci-dessus

Études géotechniques

Elles comportent deux volets :

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

L'étude de qualification des matériaux à traiter comprend :

- *l'identification des matériaux à partir des paramètres reconnus significatifs vis-à-vis du traitement*
- *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.

- **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**

Une étude de formulation comprend généralement :

- **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.
- **La détermination des dosages en produit de traitement à incorporer au sol:** en fonction des performances recherchées et, éventuellement, des types de liant

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, organisation de chantier à prévoir, qualité du résultat obtenu, etc.)

❑ **La confirmation des performances mécaniques annoncées**

❑ **Certains problèmes technique et environnementale** : 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.

- une très forte sensibilité de l'environnement vis-à-vis des émissions de poussières de produit de traitement,

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.

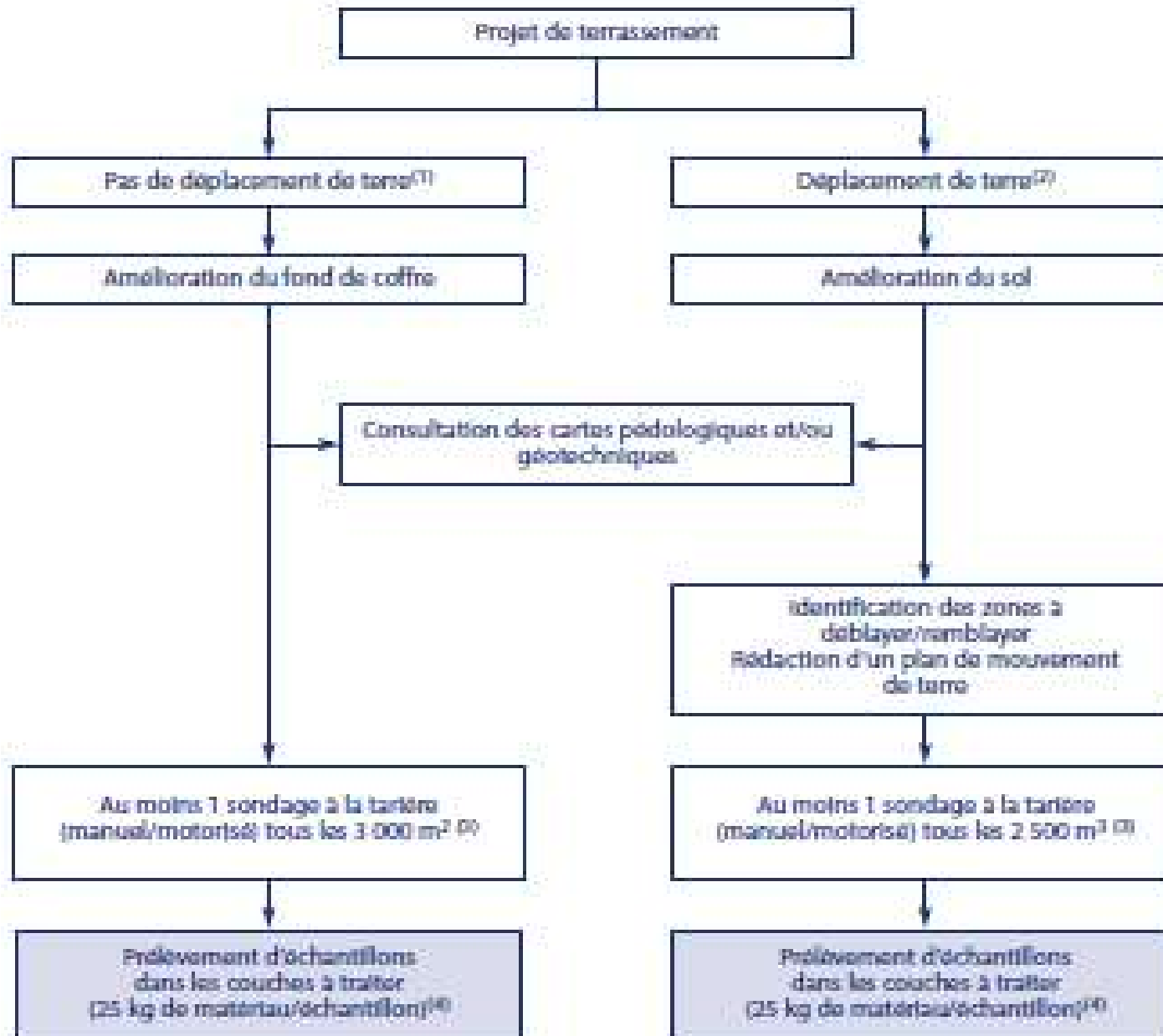
❖ **Les modalités particulières du marché à établir**

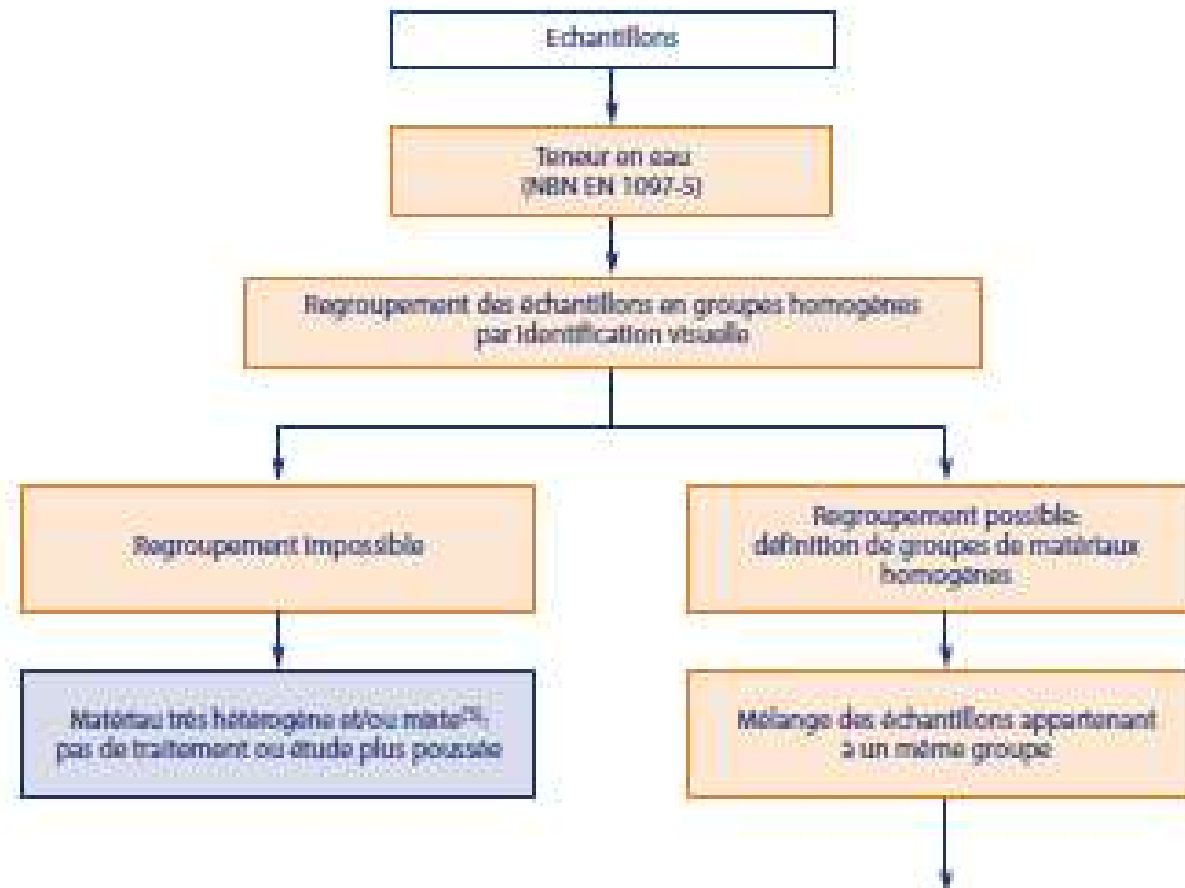
Il faut que le marché du chantier expérimental soit rédigé de manière à laisser au responsable de l'étude une large initiative sur le choix des matériels et sur les modalités de leur utilisation au vu des constatations et conclusions dégagées au fur et à mesure de son déroulement. Pour ce faire, il sera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

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

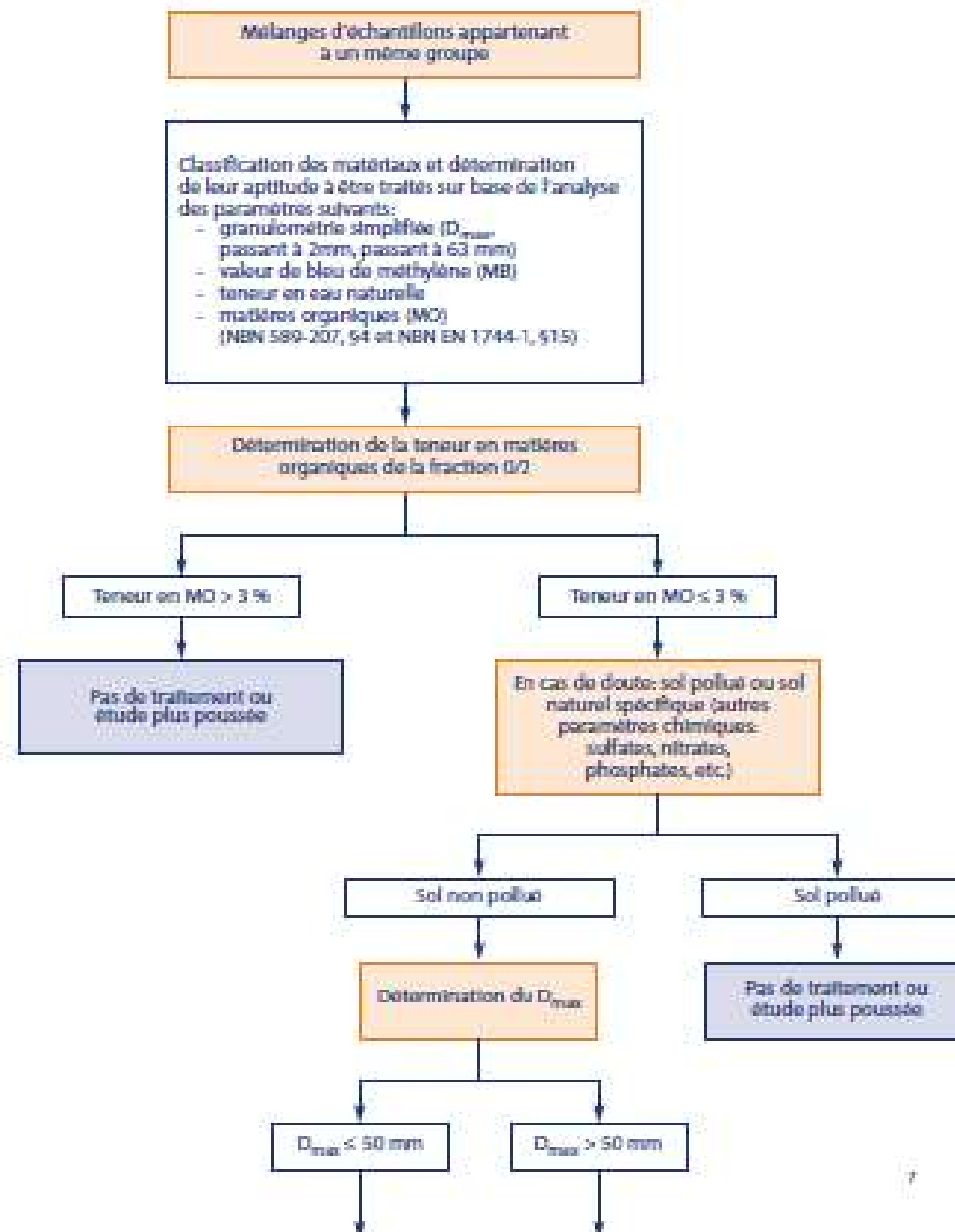
pour analyser, interpréter les mesures et les constatations et établir la synthèse du chantier. Il est difficilement acceptable en effet, eu égard au coût relatif des moyens engagés, de devoir se priver d'informations objectives importantes faute d'avoir pu réunir, au moment du chantier expérimental,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

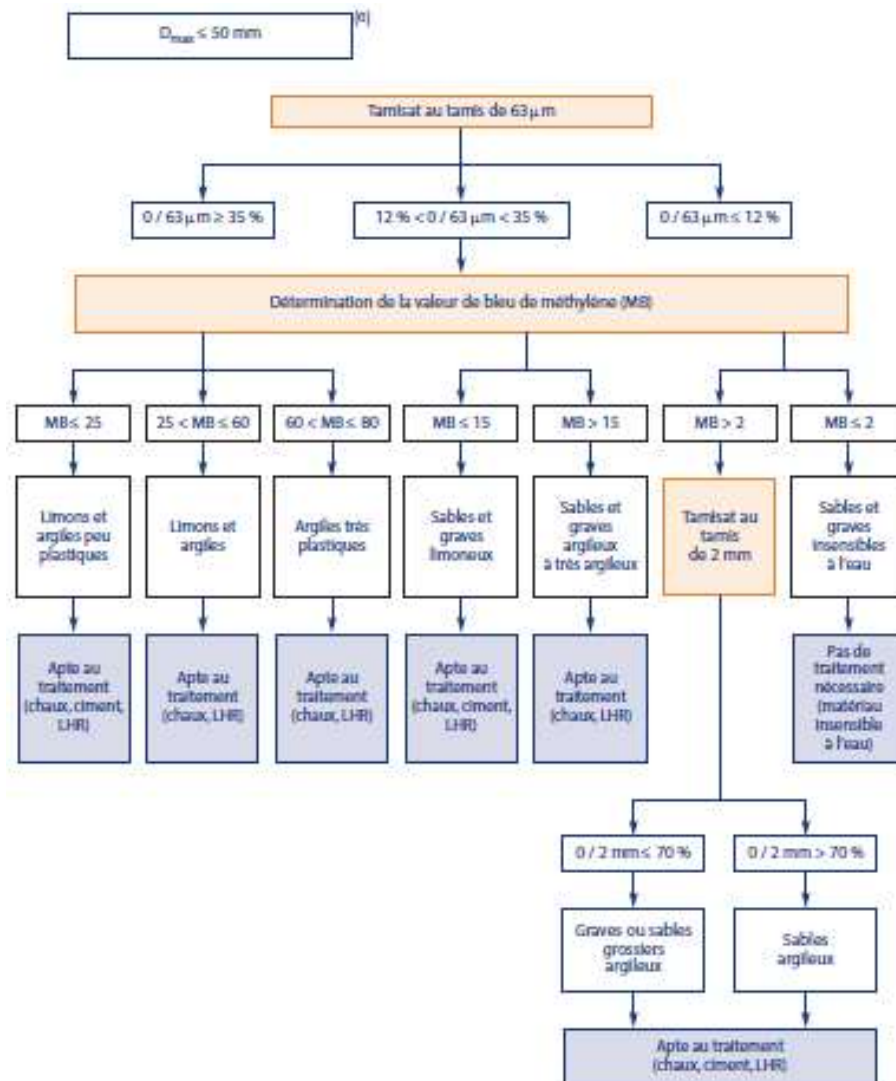
Prélèvement d'échantillons

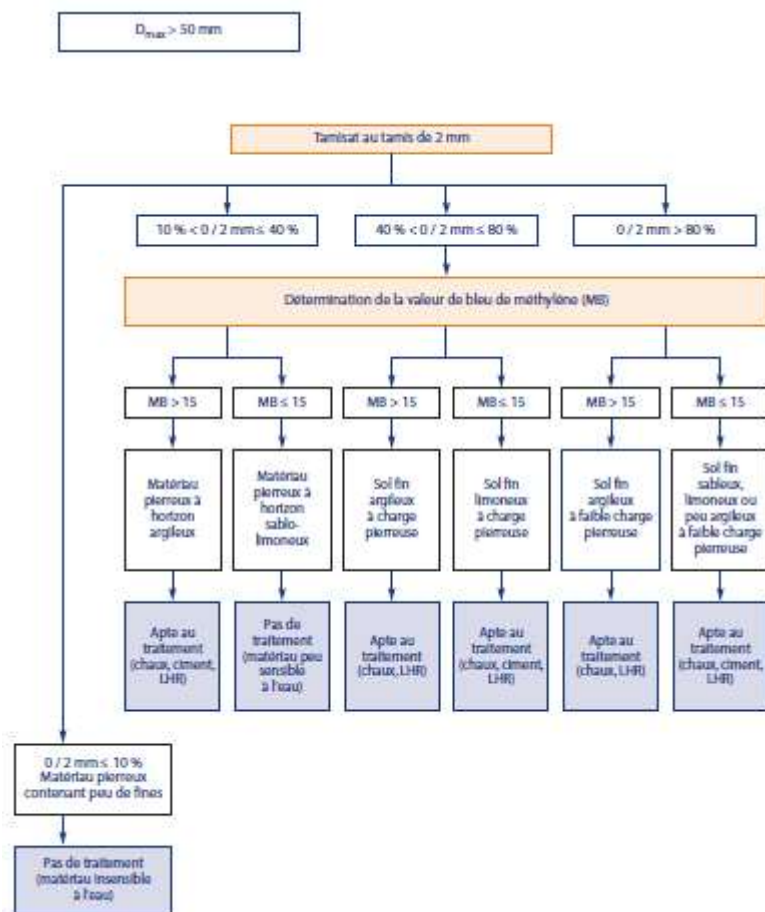




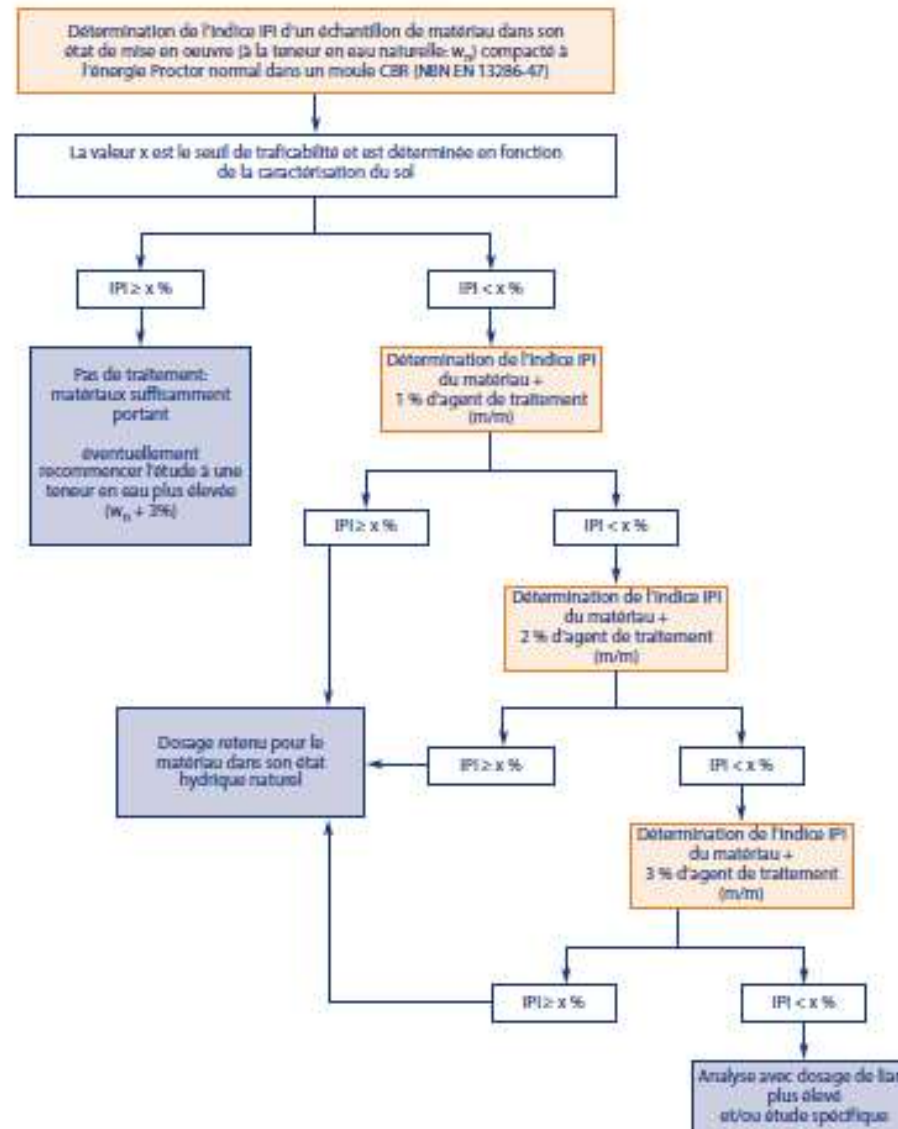
Séparation des sols







5.2 Analyse simplifiée pour chantier de taille inférieure à 2 500 m²



Stabilisation	Indice de plasticité ⁽¹³⁾							Dosage
	0	5	10	15	20	25	30 et +	
	Valeur de bleu (g de bleu/kg de matériau) ⁽¹³⁾							
	0	10	15	22	30	40	60 et +	
Chaux								4 à 8 %
LHR sans chaux comme constituant principal								4 à 8 %
Ciment								4 à 8 %
Mixte (chaux puis liant hydraulique)								1 - 2 % chaux + 4 - 6 % liant hydraulique
Un seul traitement (LHR contenant de la chaux)								4 à 8 %

Tableau 3 Tableau de synthèse indiquant, en fonction de la plasticité du sol (traduite par la valeur de l'Ip ou de la MB⁽¹³⁾), le traitement de stabilisation à envisager ainsi que les dosages pratiqués