

CARACTERISATION DE SOLS URBAINS POUR UNE UTILISATION EN TERRASSEMENT ROUTIER

CHARACTERIZATION OF URBAN SOILS FOR USE IN ROAD EARTHWORKS

Katia Bellagh¹, Thomas Lenoir², Hélène Paulus³, Myriam Duc¹, Emmanuel L'Huillier⁴, Philippe Gotteland⁵, Jean-Pierre Magnan¹.

¹IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, Champs-sur-Marne, 77442 Marne-la-Vallée.

²IFSTTAR, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais.

³ESITC, 28 Avenue du Président Wilson, 94 234 Cachan, France.

⁴Razel Bec, 3 Rue René Razel, 91400 Saclay, France.

⁵FNTP, 3 rue de Berri, 75000 Paris, France

RÉSUMÉ – Dans un contexte de protection de l'environnement et de développement durable, la valorisation des sols urbains dans les techniques routières offre des perspectives intéressantes. Elle permet une économie des ressources non renouvelables en granulats naturels et de limiter le coût de leur mise en décharge. La présente étude démontre que la composition complexe des deux sols urbains testés et leur teneur élevée en sulfate, affectent assez peu les caractéristiques géotechniques et les performances mécaniques requises en techniques routières.

ABSTRACT – In the context of environment protection and sustainable development, recycling urban soils in road applications seems to be an interesting solution. Recycling allows to reduce the use of natural resources and limit the growing cost of their disposal into landfills. The present article shows that the complex mineralogical composition and the high sulfate content of the two studied urban soils have a low impact on the geotechnical characteristics and the mechanical performance, required for road construction.

1. Introduction

Dans une perspective de protection de l'environnement, les lois Grenelle 1 et 2 orientent les producteurs de déchets vers une valorisation de ces derniers plutôt que vers une installation de stockage. Le code de l'environnement a établi une pyramide pour la hiérarchisation de l'utilisation des déchets qui favorise la réutilisation plutôt qu'un stockage ou une élimination. Cette solution est à la fois une alternative et une nécessité pour la plupart des pays industrialisés, tant d'un point de vue économique qu'environnemental. Cela provient d'une part d'une diminution des ressources non renouvelables en granulats naturels et d'autre part du coût élevé de la mise en décharge de ces déchets (Arulrajah et al., 2013). Dans notre étude, nous nous intéressons à la valorisation des sols urbains « faiblement » pollués (comparativement aux friches industrielles) qui sont considérés comme des déchets dès lors qu'ils sortent de l'emprise du chantier d'où ils proviennent (Directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008). Ces sols peuvent présenter plusieurs types de pollution ou contenir des déchets (au sens commun) comme des déchets de démolitions/construction du BTP, des sous-produits de fonderies (type laitier) ou encore des polluants issus des activités industrielles et des voiries... Leur définition est par conséquent assez complexe et leurs caractéristiques variées. En effet, les divers remaniements en zone urbaine liés à l'aménagement des terrains engendrent une hétérogénéité des sols en surface et en profondeur. Cette hétérogénéité rend la connaissance des sols urbains extrêmement difficile. Leur valorisation en France dans les

techniques routières nécessite le respect d'un certain nombre de critères géotechniques et environnementaux. La valorisation des déchets a suscité beaucoup de recherches pour valider les propriétés mécaniques qui permettent leur mise en œuvre dans les infrastructures routières. Cependant, dans ces études, les auteurs se sont intéressés à un seul type de déchet (utilisé de manière isolée) et non un mélange de plusieurs qui se retrouvent incorporés à du matériau naturel comme c'est le cas dans les sols urbains. De plus, en général, les aspects environnementaux et géotechniques sont également traités de manière séparée. La présente étude cherche à prouver qu'un sol urbain qui est un mélange de matériaux anthropiques et naturels présente, en dépit de sa composition complexe et de la présence de pollutions, des propriétés acceptables pour être réutilisé en techniques routières.

2. Matériels et méthodes

Les deux sols urbains étudiés proviennent de la région Parisienne. De même nature géologique, ils sont cependant issus de sites exploités de manière différente. Le premier (Boulogne) provient d'un site industriel et le second (Ivry) est excavé d'un remblai au niveau du périphérique parisien.

Ils présentent une forte contamination en sulfate (soit des quantités lixiviées de l'ordre de 12900 mg/kg pour le sol de Boulogne et 10660 mg/kg pour le sol d'Ivry (test de lixiviation NF EN 12457-2)) et certains métaux dont les teneurs sont en dessous des seuils environnementaux pour une réutilisation en technique routière selon la réglementation française (Setra, 2011).

La préparation des matériaux, à savoir une réduction granulométrique (criblage et concassage de la fraction supérieure à 20 mm), une homogénéisation et un sous-échantillonnage a permis d'avoir des matériaux homogènes, représentatifs des matériaux initiaux et avec une dimension maximale de 20 mm. Les matériaux ont été caractérisés du point de vue géotechnique et minéralogique. Une étude de formulation pour une réutilisation en couche de forme (suivant le guide GTS, 2000) a également été réalisée. La caractérisation des matériaux comporte :

- Une identification géotechnique suivant la norme (NF P 11-300, 1992). Les essais entrepris ont permis de classer les matériaux, il s'agit :
 - D'une analyse granulométrique (NF P 94-056, 1996) et (NF P 94-057, 1992).
 - Une détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-052-1, 1995)
 - Mesure de la valeur au bleu de méthylène (VBs) (NF P94-068, 1998)
 - la mesure de la teneur en matière organique sur les fractions 0/0.08 mm et 0/2 mm) suivant la norme NF EN 15169 (2007)
 - La mesure de la masse volumique des particules solides sur la fraction 0/2mm et 0/0.08 par la méthode du pycnomètre à eau (NF P 94-054, 1991) puis sur la fraction 2/20 mm (NF EN 1097-6, 2014)
 - Un essai Proctor normal (NF P 94-093) et une mesure de l'Indice Portant Immédiat (IPI) du sol (NF P 94-078)
- Une Identification des composants des squelettes granulaires par des essais de tri (NF EN 933-11, 2009). L'essai consiste à séparer visuellement les différentes familles de matériaux qui composent les sols. Les scories n'étant pas incluses dans cet essai, elles ont été séparées en matériaux ferreux et non ferreux au moyen d'un aimant en réadaptant la norme NF EN 1744-8, 2012.

Ensuite, une étude de formulation a été entreprise suivant les modalités de réutilisation des matériaux détaillées dans le GTS (2000). Cette étude a pour but de valider les performances mécaniques du matériau traité à la chaux et/ou au ciment lors d'une réutilisation en technique routière. Le sol a été traité soit avec 5% d'un ciment normalisé (CEMII/ B (LL-W) 42.5 R CE) soit avec 1 % de chaux. Les essais de laboratoire entrepris ont permis au final d'avoir la classe mécanique des sols testés. Un essai d'évaluation de l'aptitude au traitement est appliqué (mesure du gonflement volumique de sol traité et de sa résistance à la compression diamétrale suivant la norme NF P 94-100). Des mesures de la résistance à la compression simple (à 7, 28 et 60 jours de cure et à 98,5% de l'OPN) et de la résistance à la traction indirecte (à 28 et 90 jours de cure et à 96 % de l'OPN) complètent les essais mécaniques réalisés sur les sols urbains testés.

3. Résultats et discussions

3.1 Classification GTR et propriétés géotechniques

La distribution granulométrique des deux sols urbains étudiés est donnée sur la Figure 1. Les courbes montrent que les deux sols présentent une granulométrie étalée avec des proportions égales en fraction grossière et une légère différence (autour de 10 %) pour la fraction fine. Les essais effectués sur la fraction fine (limites d'Atterberg et essai au bleu de méthylène dans le (Tableau 1) ont montré que les deux matériaux présentent une faible activité argileuse.

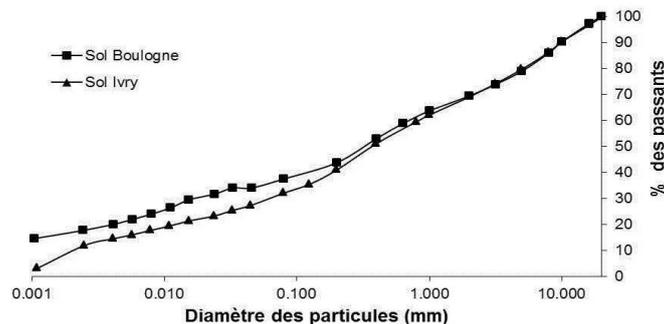


Figure 1. Courbes granulométriques de deux sols urbains

La masse volumique des particules solides a été évaluée sur la fraction fine et la fraction grossière avant et après calcination. Les résultats montrent des différences entre les deux fractions qui seraient dues à la présence de matière plus légère dans la fraction grossière (dont une part de matière organique qui disparaît avec la calcination à 550 °C). Par ailleurs, la teneur en matières organiques mesurée sur les fractions 0/0,08 mm et 0/2 mm reste faible dans les deux sols. Finalement, les caractéristiques rassemblées dans le Tableau 1 permettent de conclure que les deux sols étudiés présentent des propriétés géotechniques quasi similaires avec cependant une différence au niveau des fines.

De prime abord, les résultats permettent de classer les matériaux de type « sols urbains » comme un sol de classe C₁A₁ pour Boulogne et C₁B₅ pour Ivry (Figure 2) selon le GTR. Cependant, l'observation visuelle des matériaux montre la présence d'une quantité non négligeable d'éléments de type déchets (Figure 2). Les matériaux de type « sols urbains » pourraient donc être considérés également comme des sous-produits industriels (en fonction du taux de déchet) et donc classés F. Finalement, il s'avère difficile de classer les sols urbains au sens des normes en vigueur (NFP 11-300, 1992).

La suite de l'étude doit montrer si ces matériaux de type « sols urbains » peuvent être considérés comme des sols naturels ou comme des déchets (granulat) en déterminant les proportions des éléments naturels et anthropiques.

Tableau 1. Propriétés géotechniques des sols urbains étudiés.

| Paramètres géotechniques | Sol Boulogne | Sol Ivry |
|--|--------------|-----------|
| Diamètre maximum | >50 mm | >50 mm |
| Tamisat à 80 µm (%) | 37,5±2,4 | 32,1±1 |
| Tamisat à 2 mm (%) | 69,4±2,1 | 69,1±3,9 |
| Limite de liquidité (%) | 21,2±0,9 | 17,6±0,01 |
| Limite de plasticité (%) | 32,1 | 29,7 |
| Valeur au bleu de méthylène (g/100g) | 0,82±0,06 | 1,05±0,02 |
| Matière organique-fraction 0/2 mm (%) | 5,2±0,05 | 6,7±0,75 |
| Matière organique-fraction 0/0,08 mm (%) | 6,3±0,1 | 9,4±0,15 |
| $\rho_s(t/m^3)$ - Fraction 0/2 mm | 2,52±0,01 | 2,58±0,01 |
| $\rho_s(t/m^3)$ - Fraction 0/0,08 mm | 2,63±0,1 | 2,60±0,01 |
| $\rho_s(t/m^3)$ - Fraction 0/2 mm après calcination | 2,72±0,02 | 2,71±0,01 |
| $\rho_s(t/m^3)$ - Fraction 0/0,08 mm après calcination | 2,71±0,1 | 2,76±0,01 |

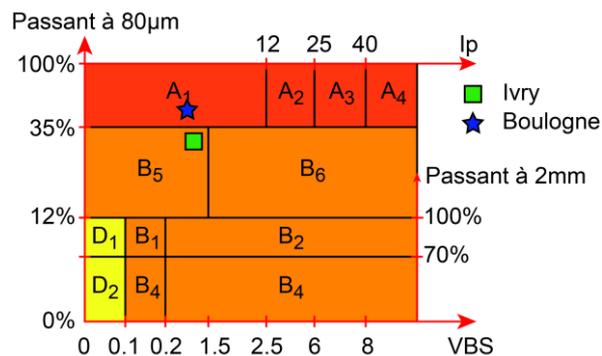


Figure 2. Classification GTR des matériaux étudiés



Figure 3: Composants du squelette granulaire des sols urbains étudiés

3.2 Composition des squelettes granulaires des sols urbains

Les résultats du Tableau 2 montrent que le squelette granulaire de matériaux testés se compose en proportion variable de produits de construction et de démolition (briques, plâtre et agrégats de béton), de sous-produits industriels (scories ferreuses et non

ferreuses) et de verre. Cette composition est typique d'un sol urbain comme le montrent les analyses de Wessolek et al. (2011) et Meuser (2010). Le gypse et les produits de démolition et de construction contribuent au relargage des sulfates qui contaminent les matériaux testés. Le gypse est présent car il est utilisé comme liant dans les mortiers de jointement des maçonneries ou comme enduit de cloisons de bâtiment mais il peut également provenir de matériaux naturels comme les roches granitiques contenant des inclusions de pyrite (qui s'oxydent pour donner du gypse). Les résultats du Tableau 2 mettent également en évidence la présence d'une proportion plus importante en artefacts (les briques, les déchets de démolition...) dans le sol de Boulogne (48.2 %). À l'opposé, le sol d'Ivry présente une part naturelle plus importante (18.1 % d'artefacts).

Tableau 2. Composition des squelettes granulaires de deux sols urbains

| Description | Composants (%) | Sol Boulogne | Sol Ivry |
|--|----------------|--------------|----------|
| Béton, éléments de maçonnerie... | R _C | 17.3 | 2.1 |
| pierres naturelles | R _u | 29.8 | 43.5 |
| Éléments en terre cuite | R _b | 1.8 | 1.3 |
| Matériaux bitumineux | R _a | 0.0 | 0.0 |
| Verre | R _g | 0.1 | 0.6 |
| Gypse, sols fins, bois, plastiques et autres | X | 50.9 | 52.5 |

3.3 Caractéristiques des sols au compactage

Les courbes Proctor des deux sols urbains étudiés sont représentées sur la Figure 4. La masse volumique sèche à l'optimum Proctor est de 1.77 t/m³ et 1.81 t/m³ respectivement pour les sols de Boulogne et Ivry. Pour les deux sols, une diminution de la densité sèche à l'optimum Proctor avec un traitement à la chaux apparaît. Cela peut s'expliquer par la réorganisation de la microstructure des sols lors du traitement avec la floculation des particules argileuses. Avec un traitement à 5% de ciment, la densité sèche optimale n'évolue pas ou peu par rapport à celle obtenue sur les sols non traités.

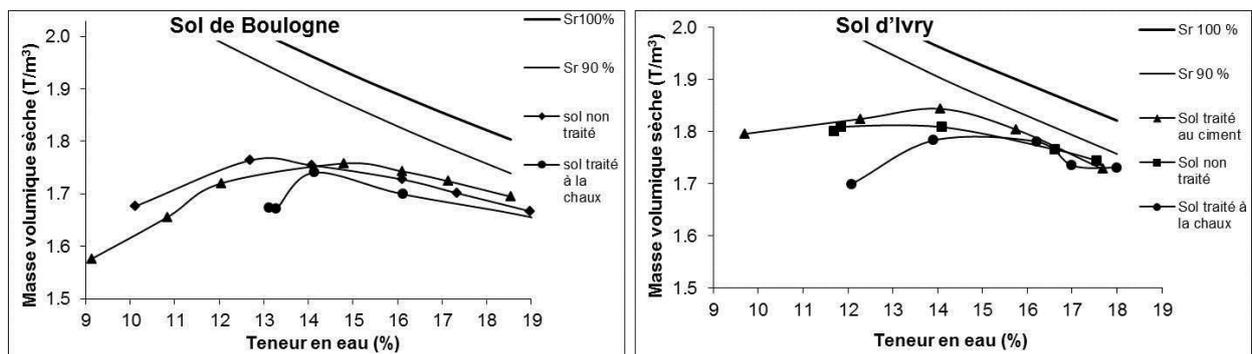


Figure 4. Caractéristiques des deux sols étudiés lors du compactage Proctor Normal

3.4 Essai d'aptitude au traitement

Le Tableau 3 présente les résultats de l'évaluation de l'aptitude des sols au traitement soit au ciment (5 % de CEM II 42.5), soit à la chaux. Les deux matériaux présentent une bonne aptitude au traitement à la chaux et au ciment en dépit des fortes teneurs en

sulfates (12900 mg/kg pour le sol de Boulogne et 10660 mg/kg pour le sol d'Ivry) et de la composition complexe de leurs squelettes granulaires (présence de gypse, de briques, de scories...). Ils présentent tous deux un gonflement volumique inférieur au seuil d'aptitude soit 5% (avec le ciment) et 10% (avec la chaux). De même, la résistance à la traction est supérieure au seuil d'aptitude au traitement soit 0,2 MPa (le seuil est atteint si l'on considère l'écart type sur la mesure pour le sol d'Ivry).

Tableau 3. Essais d'aptitude aux traitements à la chaux et au ciment.

| Aptitude aux traitements | Sol Boulogne | | Sol Ivry | |
|--|--------------|---------|-----------|-----------|
| | Ciment | Chaux | Ciment | Chaux |
| Gonflement volumique(%) | 2,1±0,7 | 5,6±0,4 | 1,1±0,8 | 2,36±1,16 |
| Résistance à la traction indirecte (MPa) | 0,35±0,1 | -- | 0,17±0,07 | -- |
| Seuils à ne pas dépasser pour une aptitude | 5 % | 10 % | 5 % | 10 % |

3.5 Caractéristiques mécaniques

Le Tableau 4 présente les résistances à la compression simple des deux sols urbains étudiés. Les éprouvettes ont été traitées à 5 % de ciment (CEM II 42.5) et compactées à 98.5% de l'OPN et à 100% de teneur en eau optimale. Les résultats sont la moyenne des mesures obtenues sur 3 éprouvettes. Ils montrent que les deux sols présentent bonne résistance au jeune âge et que la résistance à la compression R_c évolue avec le temps de cure (Figure 5). Si R_c continue d'augmenter au bout de 60j avec le sol de Boulogne, R_c semble s'être stabilisé dès 28 jours avec le sol d'Ivry. La légère diminution observée à 60j pour le sol d'Ivry devra être confirmée.

Tableau 4. Résistance à la compression des deux sols à différent temps de cure

| | Rc 7 jours (MPa) | Rc 28 jours (MPa) | Rc 60 jours (MPa) |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Sol de Boulogne | 1,2±0,1 | 2,0±0,1 | 2,6±0,2 |
| Sol d'Ivry | 0,65±0,07 | 1,85±0,37 | 1,67±0,27 |

La résistance des deux matériaux à la traction indirecte R_{it} et le module élastique E sont présentés dans le Tableau 5. Ces résultats ont permis l'estimation de la résistance à la traction directe R_t ($R_t = 0.8 \times R_{it}$). Le couple (R_t , E) permet de positionner les sols sur la Figure 5 où sont délimitées différentes zones mécaniques suivant le GTS. Les résultats montrent qu'avec un traitement de 5 % de ciment les deux sols présentent des performances mécaniques tout à fait acceptables (à 28 jours de cure) pour une réutilisation en couche de forme dans les chaussées.

Tableau 5. Résistance à la traction et module des matériaux étudiés

| | R_{it} à 28 jours (MPa) | R_t (MPa) | Module E (GPa) |
|-----------------|---------------------------|-------------|----------------|
| Sol de Boulogne | 0,29±0,02 | 0.23 | 3702±731 |
| Sol d'Ivry | 0,18±0,05 | 0.14 | 3100 |

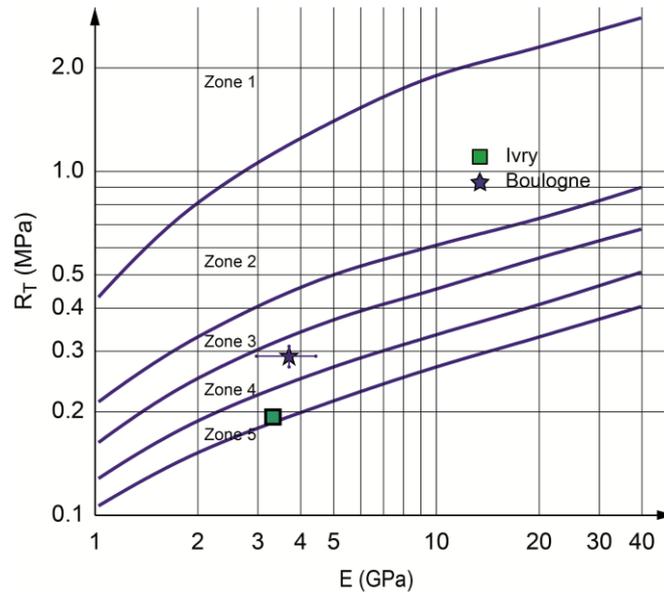


Figure 5. Position des matériaux étudiés dans les zones mécaniques du GTS.

4. Conclusions et perspectives

Les résultats présentés dans cet article montrent que les deux sols urbains qui ont été testés, malgré leur composition complexe (mélange de matériaux naturels et anthropiques), présentent des propriétés géotechniques satisfaisantes et des performances acceptables pour une application en techniques routières. La présence en particuliers de fortes teneurs en sulfates et d'artefacts dans ces sols n'affecte pas ou peu le traitement au ciment et la chaux.

Reste à voir l'évolution à long terme.

5. Remerciements

Cette recherche a été effectuée à l'IFSTTAR avec le soutien de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)

6. Références bibliographiques

- Arulrajah, A, Piratheepan, J; Disfani, M.M; Bo, M.W. 2013. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*; 25(8):1077 - 1088.
- Meuser, H. 2010. *Contaminated Urban Soils*. s.l. : Springer Science+Business Media.
- Wessolek, G, Kluge B., Toland A., Nehls T., Klingelmann E., Rim Y.N. Mekiffer B. Trinks S, 2011. Urban soil in the vadose zone. Chapitre 4, p89-133, dans Endlicher W., *Perspectives in Urban Ecology Ecosystems and Interactions between Humans and Nature in the Metropolis of Berlin*, Springer.

- Yang, Y., Aplin, A.-C. 1998. Influence of lithology and compaction on the pore size distribution and modelled permeability of some mudstones from the Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology*; 15(2):163-175.
- GTS. 2000, Guide technique du traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de formes. SETRA-LCPC.
- Setra, 2011, Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière. Évaluation environnementale. Guide SETRA, mars 2011
- NF P94-052-1, 1995 Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.
- NF P94-068, 1998. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- NF EN 1097-6, 2014 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
- NF P94-054, 1991. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- NF EN 15169, 2007. Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments
- NF P94-093, 2014. Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié - Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié
- NF P94-078 Mai 1997. Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- NF P11-300, 1992. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- NF EN 933-11, 2009 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés
- NF EN 1744-8 Novembre 2012 Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 8 : essai de comptage des particules métalliques contenues dans les granulats provenant de mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND) - Essai de tri pour déterminer la teneur en métaux des granulats de mâchefer d'usines d'incinération
- NF P94-100 Août 2015 Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement