

# EVOLUTION MECANIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE A LONG TERME D'UN SOL LIMONEUX TRAITÉ A LA CHAUX

## LONG-TERM MECHANICAL AND PHYSICO-CHEMICAL EVOLUTION OF SILTY SOIL TREATED WITH LIME

Ir Régis DE BEL<sup>1</sup>, Prof. António GOMES CORREIA<sup>2</sup>, Prof. Paul-Henri DUVIGNEAUD<sup>3</sup>, Prof. Bertrand FRANCOIS<sup>4</sup>, Dr Gontran HERRIER<sup>5</sup>, Prof. Jean-Claude VERBRUGGE<sup>6</sup>

1 Centre de Recherches Routières, Bruxelles, Belgique

2 Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

3, 4 et 6 Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique

5 Lhoist R&D, Nivelles, Belgique

**RÉSUMÉ** – Cet article présente une partie des résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche COGESTAC. Le programme d'essais porte sur un sol limoneux traité à la chaux et couvre à la fois des aspects mécaniques et des aspects physico-chimiques. Cette approche multi-échelle a permis, grâce au suivi sur le long terme de l'évolution des caractéristiques du mélange sol-chaux, de mettre en évidence des résultats intéressants : l'évolution des propriétés mécaniques du sol traité, principalement liée à une augmentation de la cohésion, ne suit pas une courbe linéaire mais s'effectue selon plusieurs étapes correspondant à des processus physico-chimiques distincts.

Mots-clés : chaux, traitement, long terme, cohésion, physico-chimique

**ABSTRACT** – The paper presents part of the results of the COGESTAC research project, more particularly of the experimental testing programme on silty soil treated with lime. In a multi-scale approach the long-term evolutions of the soil-lime characteristics were monitored, focusing on mechanical as well as physico-chemical aspects. At the outcome, the following interesting result could be put forward: the evolution of the mechanical characteristics of the treated soil, which is mainly linked to an increase of cohesion, does not follow a linear curve but is rather a multi-step evolution linked to distinct physico-chemical processes.

Keywords: lime, treatment, long-term, cohesion, physico-chemical

## 1. Introduction

Le traitement à la chaux est une technique qui a été largement utilisée en Belgique lors du développement du réseau autoroutier à partir de la fin des années '60 puis redécouverte lors de la construction des LGV (Lignes à Grande Vitesse) au début des années '90. L'amélioration des sols trop humides ou limono-argileux par ajout de chaux est actuellement une technique largement utilisée pour diverses applications : remblais et remblaiement de tranchées, PST, couches de forme, plates-formes industrielles, pistes forestières, assises de chaussées à faible trafic,... En outre, le traitement permet une réutilisation des sols en place, évitant leur mise en décharge et préservant les matériaux nobles que sont les granulats de nos carrières. Les gains économiques, mais aussi environnementaux, que peut engendrer le traitement des sols à la chaux ne sont plus à démontrer.

Il y a toutefois encore des avantages liés au traitement à la chaux qui restent sous-exploités : ce sont les effets à long-terme sur les propriétés du matériau, désignés sous le terme de « stabilisation ». En effet, si l'amélioration de l'ouvrabilité du matériau par traitement à la chaux est bien connue par les acteurs du terrassement, il est également possible de tirer profit des effets de la stabilisation, par exemple en tenant compte de l'évolution des propriétés mécaniques sur le long terme lors des calculs de dimensionnement.

Bien que la littérature ait déjà mis en évidence l'apparition de réactions pouzzolaniques entraînant la formation de CSH et de CAH<sup>1</sup>, les connaissances sur les processus d'évolution du matériau restent encore limitées. Dans le cadre du projet de recherche COGESTAC<sup>2</sup>, d'une durée de quatre ans,

<sup>1</sup> Les CSH et CAH, respectivement silicates et aluminates de calcium hydratés, sont des produits résultant des réactions sol-chaux similaires aux produits formés lors de la prise hydraulique des ciments.

<sup>2</sup> COmportement GEomécanique des Sols STabilisés à la Chaux

l'évolution à long terme de différents sols traités à la chaux a été étudiée en laboratoire, tant au niveau des effets mécaniques qu'au niveau de l'évolution des propriétés physico-chimiques.

Les résultats présentés dans cet article portent sur l'évolution à long terme (jusqu'à 730 jours) des propriétés mécaniques d'un sol limoneux traité à 3% de chaux vive et sur les résultats de diverses techniques d'investigation des aspects physico-chimiques. Le but étant de mieux comprendre le lien entre l'évolution physico-chimique du matériau et l'amélioration de ses propriétés mécaniques au cours de sa vie.

## 2. Matériaux et méthodes d'essai

### 2.1. Sol limoneux de Marche-les-Dames

Le sol utilisé pour les essais décrits ci-après est un sol limoneux d'origine éolienne provenant des terres de découverte de la carrière de Marche-les-Dames, située près de Namur en Belgique.

Les principales caractéristiques de ce sol, dénommé par la suite MLD, sont les suivantes (De Bel, 2006) :

- teneur en eau naturelle ( $w_{nat}$ ) : 22% ;
- granulométrie : 98% < 80  $\mu\text{m}$  et 16% < 2  $\mu\text{m}$  ;
- teneur en matière organique (par méthode de Demande Chimique en Oxygène) : 0,2% ;
- masse volumique des particules solides ( $\gamma_s$ ) : 27,18 kN/m<sup>3</sup> ;
- limites d'Atterberg (NF P 94-051) : limite de liquidité ( $w_L$ ) : 31,0%, limite de plasticité ( $w_P$ ) : 20,1%, indice de plasticité (IP) : 10,9% ;
- classification selon la norme française NF P 11-300 : A1 ;
- Optimum Proctor Normal (NF P94-093) :  $\gamma_{dmax} = 18,1$  kN/m<sup>3</sup> et  $w_{OPN} = 15,1\%$ .

### 2.2. Chaux vive

Lors de cette étude, une chaux vive calcique CL 90-Q (selon la norme EN 459-1) du groupe Lhoist a été utilisée. Celle-ci présente les caractéristiques suivantes :

- granulométrie<sup>3</sup> : 99,98% < 2 mm et 83% < 80  $\mu\text{m}$  ;
- teneur en chaux disponible : 91,2% ;
- réactivité :  $t_{60} = 2,17$  minutes.

### 2.3. Préparation des éprouvettes

Les mélanges sol-chaux ont été préparés par mélange à sec de la chaux avec le sol séché à l'air, préalablement à l'ajout de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau de l'OPN. Après une période de conditionnement de deux heures à l'état humide, le mélange est compacté. Suivant les recommandations du GTR (Setra-LCPC, 1992), les éprouvettes sont confectionnées par compactage statique à 98,5% de la masse volumique sèche maximale de l'OPN. Pour les essais de compression simple et pour les essais triaxiaux, les éprouvettes cylindriques présentent un diamètre de 3,6 cm et une hauteur de 7,2 cm.

Les résultats présentés ici sont relatifs à des éprouvettes traitées à 3% de chaux vive correspondant au point de fixation de la chaux déterminé par l'essai d'Eades and Grim (1960). Durant leur cure, les éprouvettes ont été conservées à température ambiante (20°C). A noter que des variantes à ces conditions d'essais, à savoir d'autres dosages en chaux (1,5 % et 4,5%) et/ou des températures de cure de 36°C et 50°C (De Bel et al., 2007) ont également été étudiées mais ne seront pas présentées ici, dans un souci de concision.

Les caractéristiques de consistance et de compactage du sol non traité et du sol traité à 3% de chaux sont présentées dans le tableau I ci-dessous.

---

<sup>3</sup> L'indication granulométrique de la chaux est valable à l'état de poudre. Une fois mélangée avec le sol, la chaux se solubilise dans l'eau sous forme de calcium labile et les produits de réaction sont directement liés aux particules de sol.

Tableau I. Caractéristiques de consistance et de compactage

	Limites d'Atterberg			Optimum Proctor Normal	
	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	IP (%)	γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>OPN</sub> (%)
<b>MLD non traité</b>	31.0	20.1	10.9	18.1	15.1
<b>MLD 3% chaux</b>	30.8	22.7	8.2	17.2	17.1

## 2.4. Essais géomécaniques

L'évolution des propriétés mécaniques avec le temps de cure<sup>4</sup> a été suivie à l'aide d'essais de résistance en compression simple modifié sur les éprouvettes non saturées à la teneur en eau optimale w<sub>OPN</sub>. Ceux-ci ont été effectués de manière similaire à des essais triaxiaux, sans pression de confinement, sur des éprouvettes à leur teneur en eau après la période de cure sans saturation préalable. Associé à des essais triaxiaux saturés, ce protocole d'essai permet d'une part de déterminer la cohésion apparente non saturée et, d'autre part, de mettre en évidence et de quantifier la cohésion résultant des réactions chimiques induites par l'ajout de chaux (Bollens et Verbrugge, 2005 ; De Bel, 2008).

L'évolution de la résistance au cisaillement du sol de MLD traité à la chaux a été étudiée sur des éprouvettes saturées au moyen d'essais triaxiaux ICU (essais non drainés à consolidation isotrope) avec mesure de la pression interstitielle (Bollens et Verbrugge, 2005).

## 2.5. Essais physico-chimiques

L'évolution de la granulométrie du matériau consécutivement à l'ajout de chaux a été suivie au moyen d'essais de sédimentométrie et de granulométrie laser. Bien que les procédures d'essai indiquent la nécessité d'ajouter un défloculant (hexaméthaphosphate de sodium) pour séparer les agrégats de particules, dans le cadre de cette étude, des courbes granulométriques ont également été établies sans cet ajout afin de mettre en évidence les effets de la chaux sur la texture du sol traité.

L'évolution physique du sol traité a également été étudiée du point de vue de sa porosité et de sa surface spécifique, déterminées par méthode BET (adsorption-désorption d'azote). Cette méthode permet de caractériser la distribution porale jusqu'à environ 150 nm (micro- et mésoporosité), mais ne couvre pas l'intégralité des pores présents dans un sol (macroporosité).

En fonction du temps de cure un suivi a été fait pour le pH du sol traité, pour la consommation de chaux à l'aide de la méthode Leduc modifiée<sup>5</sup> ainsi que pour la capacité d'échange cationique (CEC) suivant la méthode Metson. La CEC d'un sol dépend principalement de la fraction argileuse et de la matière organique qu'il contient.

La diffractométrie de rayons X (DRX) permet de détecter qualitativement la présence des minéraux cristallisés dans l'échantillon. L'échantillon est préalablement écrêté au tamis de 2 μm afin de concentrer la fraction minérale (fraction argileuse) qui est la plus susceptible de subir des altérations suite à l'ajout de chaux.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Evolution des propriétés géomécaniques

La figure 1 montre l'évolution de la résistance à la rupture en compression simple (R'<sub>c</sub>) du sol de MLD traité à 3% de chaux pour des temps de cure jusqu'à 730 jours (à 20°C).

L'ajout de chaux a pour effet d'augmenter immédiatement la résistance à la compression du sol (+50%). L'évolution en fonction du temps montre clairement deux étapes différentes avec un point d'inflexion vers 112 jours. Cette constatation rejoint les observations faites par Perret (1979) qui avait également mis en évidence des étapes distinctes dans l'évolution de la résistance d'un sol traité à la chaux. L'amélioration des propriétés mécaniques se poursuit pour des temps de cure d'au moins 730 jours, atteignant alors une résistance de plus de vingt fois supérieure à celle du sol non traité !

<sup>4</sup> Le temps de cure représente le temps pendant lequel le mélange acquiert sa maturation, c'est-à-dire le délai entre la confection des éprouvettes et la réalisation des essais

<sup>5</sup> La consommation de chaux est évaluée par différence entre la quantité de chaux ajoutée et la chaux libre résiduelle déterminée au moyen d'une procédure d'essai par titration à l'acide chlorhydrique.

Les résultats des essais triaxiaux ICU, sont représentés à la figure 2 en termes de cohésion effective ( $c'$ ) et d'angle de frottement interne ( $\varphi'$ ).

Ces résultats permettent d'attribuer l'augmentation de résistance à la compression à un accroissement de cohésion en fonction du temps de cure. L'angle de frottement interne subit moins de variation suite à l'addition de chaux. Cet aspect confirme, pour des temps de cure plus longs, les conclusions déjà formulées à la suite de plusieurs travaux de recherches mettant en évidence le rôle de la cohésion des mélanges sol-chaux dans l'évolution des propriétés mécaniques (Verhasselt, 1978 ; Little, 1995 ; Bollens et al., 2003 ; Bollens et Verbrugge, 2005 ; Cabane, 2006).

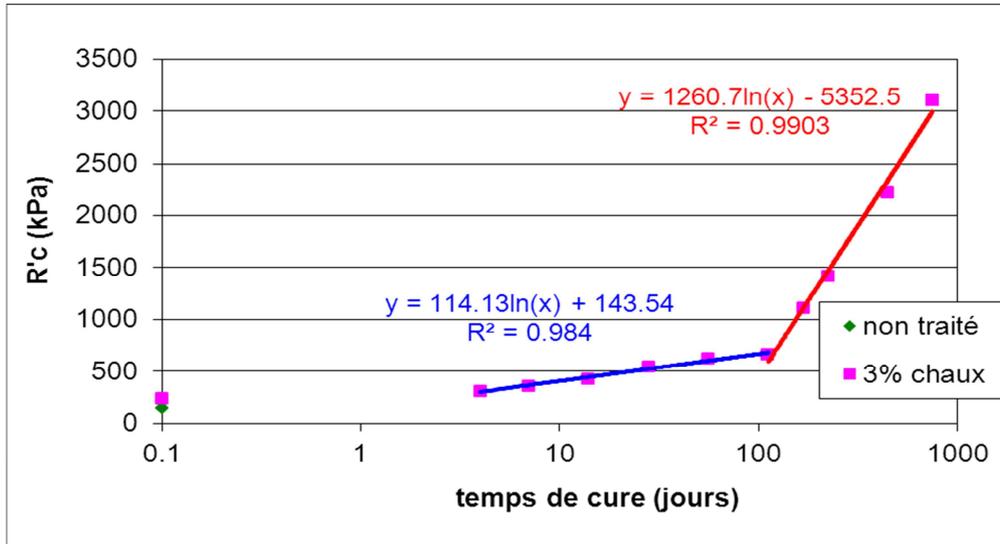


Figure 1. Evolution de la résistance du sol de MLD traité à 3% de chaux vive en fonction du temps de cure (Verbrugge et al., 2011).

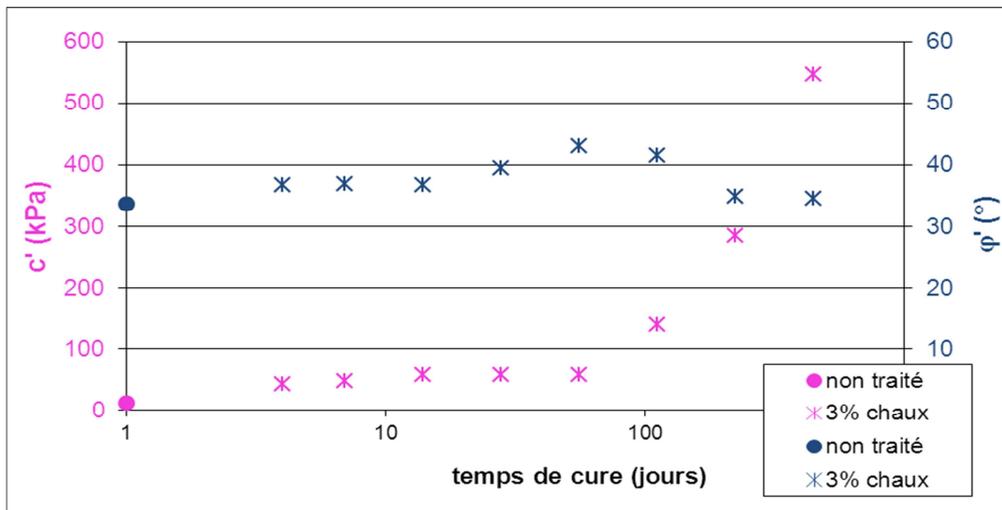


Figure 2. Evolution des paramètres ultimes au cisaillement  $c'$  et  $\varphi'$  (De Bel et al., 2009).

La loi de Coulomb permet de calculer la résistance au cisaillement d'un sol à partir de la cohésion et de l'angle de frottement interne. Si pour un sol non traité saturé, la contrainte de cisaillement vaut :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (1)$$

Dans le cas d'un sol traité non saturé, on peut étendre cette relation en y ajoutant une contribution de la cohésion apparente  $c_a$  due à la non saturation, et une autre de la cohésion  $c_i$  liée aux réactions sol-chaux (De Bel, 2008).

$$\tau = (c' + c_a + c_i) + \sigma' \tan \varphi' \quad (2)$$

Compte tenu du mode opératoire des essais en compression simple décrit en 2.4 et des essais triaxiaux ICU dont les éprouvettes sont préalablement saturées, il est possible, de dissocier d'une part la cohésion effective et celle apportée par les réactions sol-chaux ( $c'+c_i$ ), et d'autre part la cohésion apparente ( $c_a$ ). Les résultats sont représentés à la figure 3.

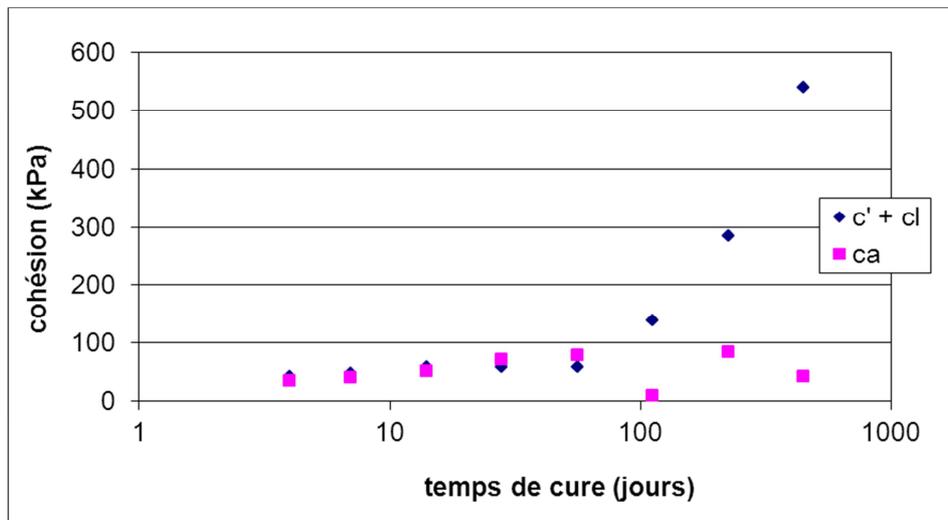
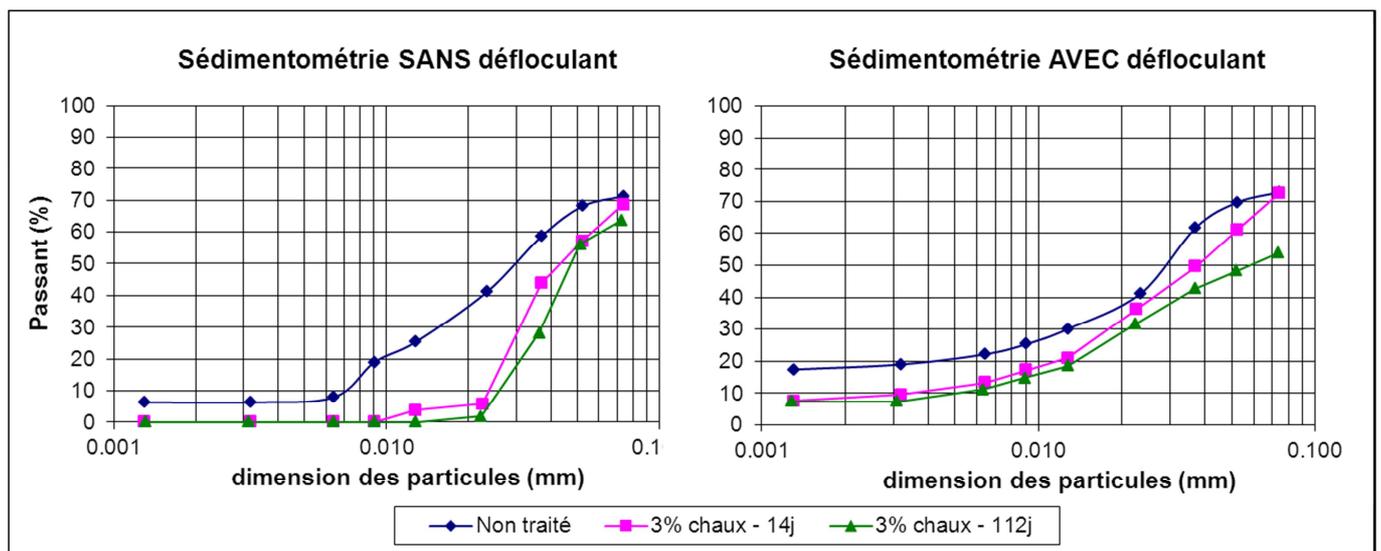


Figure 3. Evolution en fonction du temps de cure de la cohésion effective et de la cohésion apportée par les réactions sol-chaux d'une part, et de la cohésion apparente d'autre part.

Cette analyse est intéressante car elle montre que la cohésion apparente est relativement stable quel que soit le temps de cure du sol traité alors que la cohésion apportée par les réactions sol-chaux augmente, et devient significativement plus importante à partir de la deuxième étape d'évolution (112 jours). Cela signifie que même en cas de saturation du matériau, la perte de cohésion se limiterait à la cohésion apparente, qui devient négligeable à long terme devant  $c'+c_i$ .

### 3.2. Phénomènes physico-chimiques

Afin d'étudier les phénomènes de floculation et d'agglomération suite au traitement à la chaux, des essais de sédimentométrie ont été effectués avec et sans défloculant sur le sol de MLD naturel et traité à 3% de chaux vive après 14 et 112 jours de cure. Les résultats des essais sans défloculant sont représentés à la figure 4a, alors que les essais avec défloculant sont repris à la figure 4b.



Figures 4a et 4b. Essais de sédimentométrie avec et sans défloculant.

La figure 4a montre clairement l'évolution immédiate de la granulométrie suite au traitement : il n'y a pratiquement plus de particules inférieures à 20  $\mu\text{m}$  alors que dans le sol naturel, celles-ci y représentent près de 40%. Les essais avec défloculant (figure 4b) mettent en évidence que l'ajout de chaux entraîne non seulement une floculation mais une réelle granulation des particules que le défloculant ne parvient plus à séparer totalement. Avec un temps de cure plus important (112 jours), ce sont également les particules plus grossières ( $\sim 60 \mu\text{m}$ ) qui semblent se lier entre elles. Cela traduit une véritable évolution de la texture du matériau liée d'une part à la floculation (liaisons ioniques faibles dues à la présence d'ions  $\text{Ca}^{2+}$ ) et d'autre part à la granulation (liaisons fortes probablement engendrées par la formation de produits pouzzolaniques).

Des courbes granulométriques ont également été établies au moyen de la technique de diffraction laser sur le sol de MLD non traité et traité à 3% de chaux après 7 et 400 jours de cure. Les résultats des essais sans ajout de défloculant sont illustrés à la figure 5a, tandis que ceux des essais avec défloculant sont représentés à la figure 5b.

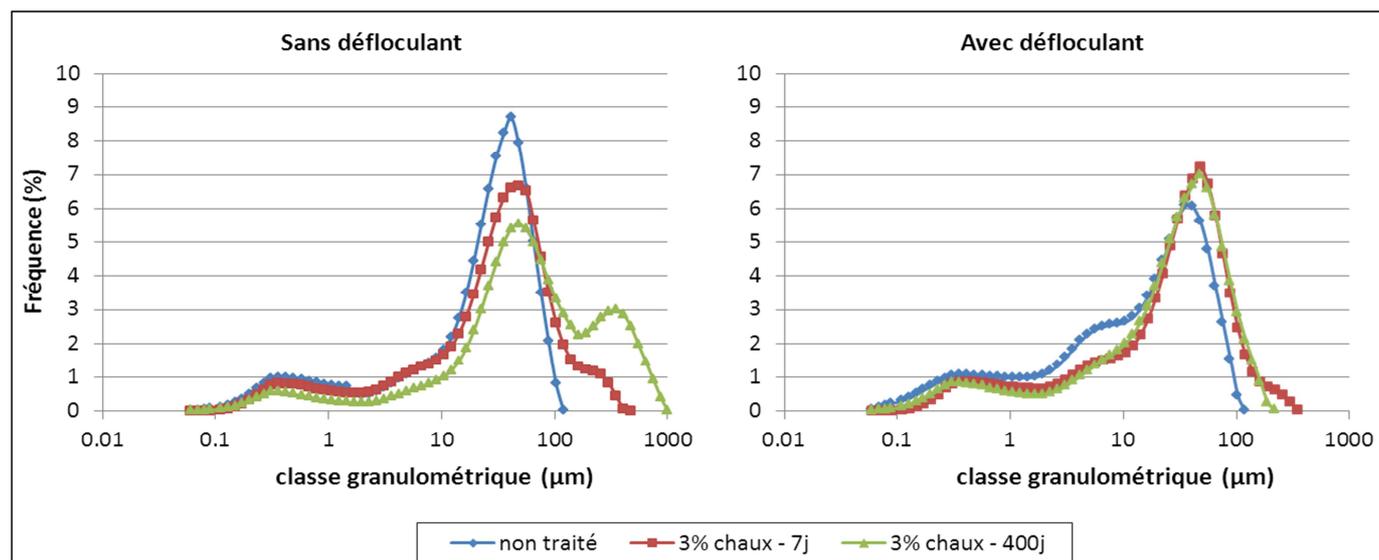


Figure 5a et 5b. Granulométrie laser sans défloculant et avec défloculant.

Le sol de MLD non traité présente trois modes de dimension de particules : 0,3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  et 35  $\mu\text{m}$ . La comparaison des figures 5a et 5b montre qu'une partie des particules de 5  $\mu\text{m}$  de diamètre se trouve normalement à l'état floculé. Après 7 jours de traitement, la proportion de particule de 0,3  $\mu\text{m}$  diminue quelque peu, mais le second mode de distribution (centré autour de 5  $\mu\text{m}$ ) se trouve plus affecté : les particules centrées autour de cette taille se retrouvent agglomérées de telle sorte que l'agent défloculant ne parvient plus à les séparer. Il en résulte une augmentation de la proportion de particules de 35  $\mu\text{m}$  de diamètre mais qui peuvent s'agglomérer entraînant l'apparition d'un nouveau mode de distribution centré autour de 200  $\mu\text{m}$ . L'essai à 400 jours de cure indique une évolution qui suit la même tendance. La quantité de grumeaux de diamètre supérieur à 100  $\mu\text{m}$  devient alors conséquente, mais la plus grande partie peut être dissociée par le défloculant. Ce mode se déplace vers une taille de particules de dimension plus importante avec le temps de cure ( $\sim 350 \mu\text{m}$ ).

Bien que les techniques de sédimentation et de diffraction laser soient différentes (Robbe et Roger, 1987), ces essais mettent en évidence deux phénomènes distincts influençant la texture du matériau suite au traitement à la chaux : une floculation menant à des liaisons faibles entre particules et une granulation liant fortement les particules entre elles.

Parallèlement aux essais de granulométrie, des essais par méthode BET permettent de visualiser la distribution des micro- et mésopores du sol de MLD non traité et traité avec 3% de chaux après 7 et 400 jours de cure (figure 6), ainsi que de déterminer la surface spécifique du matériau (tableau II).

Dans le domaine étudié, le sol non traité présente un mode principal de porosité centré aux alentours de 4 nm. Une diminution de ce mode est observée directement après traitement et se poursuit avec le temps de cure. L'apparition d'un nouveau mode vers 6 nm dans l'échantillon de sol traité après 400 jours de cure résulte probablement de l'attaque (déstructuration) des feuilletts argileux et de la formation de nouveaux produits pouzzolaniques. Ces observations indiquent une altération de la structure du matériau traité avec le temps de cure.

La surface spécifique BET du sol (tableau II) diminue directement après traitement à la chaux, mais augmente ensuite avec le temps de cure. Alors que la floculation des particules peut expliquer l'évolution à court terme, la déstructuration des particules argileuses (attaque des particules argileuses en milieu basique) et la formation de produits pouzzolaniques (CSH et CAH) sont probablement responsables de l'évolution à long terme.

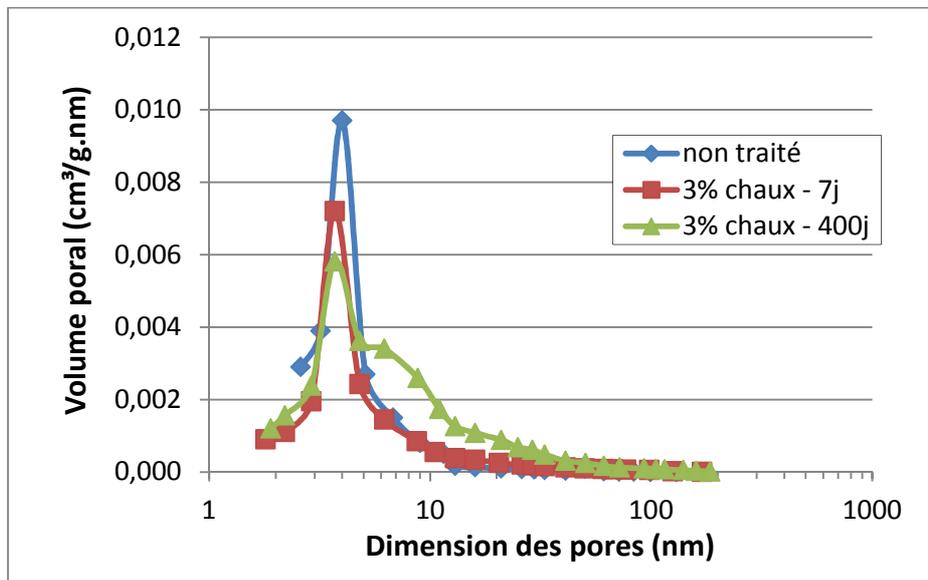


Figure 6. Distribution des pores dans le sol non traité et traité après 7 et 400 jours.

Tableau II. Surfaces spécifiques du sol de MLD avant et après traitement

MLD	non traité	3% chaux 7 jours	3% chaux 400 jours
Surface spécifique (m²/g)	23.3	13.3	21.6

L'évolution du pH (figure 7), de la consommation de chaux (figure 7 et 8a) et de la CEC (figure 8b) du sol de MLD traité à 3% de chaux a été suivie pour des temps de cure allant jusqu'à 730 jours (à 20°C).

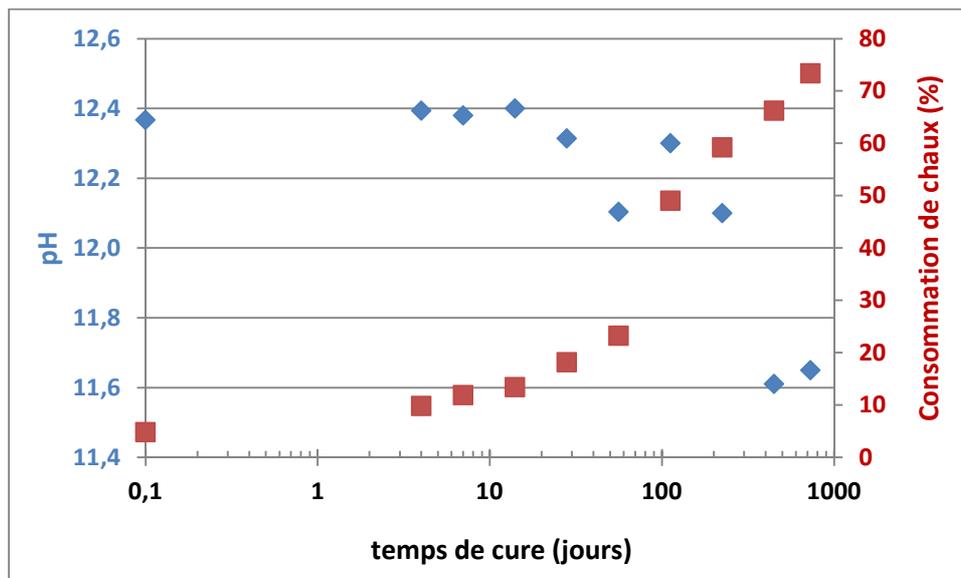
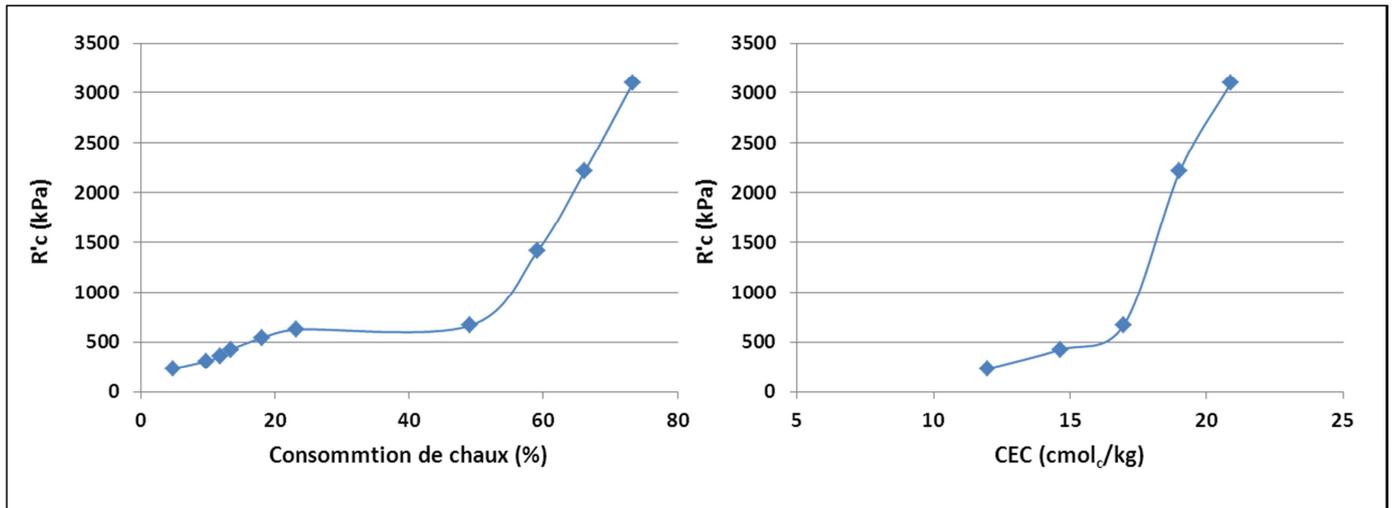


Figure 7. Evolution du pH et de la consommation de chaux en fonction du temps de cure.

L'ajout de 3% de chaux permet d'atteindre un pH de l'ordre de 12,4, ce qui correspond à celui d'une solution saturée en hydroxyde de calcium. Cette valeur de pH reste stable durant la première étape d'évolution, jusque 112 jours environ (voir figure 1). Le pH diminue alors pour se stabiliser à une valeur

d'environ 11,6. La correspondance avec la consommation de chaux révèle une forte activité lors de cette première étape d'évolution (correspondant à une consommation de chaux de l'ordre de 50%), mais durant laquelle l'augmentation de la résistance est plus lente (figure 8a). Lorsque la disponibilité en chaux commence à diminuer, le pH diminue et une nouvelle étape d'évolution débute.



Figures 8a et 8b. Evolution de la résistance du sol de MLD traité à 3% de chaux en fonction de la consommation de chaux (8a) et de la capacité d'échange cationique (8b).

L'évolution de la CEC est similaire à celle de la consommation de chaux. Elle subit une élévation importante dès les premières semaines de cure, ce qui peut s'expliquer par une attaque des minéraux argileux par la chaux suite à l'augmentation du pH. En effet, une altération de la structure des feuillets argileux induit une augmentation de la capacité d'échange cationique. De plus, les CSH produits lors des réactions pouzzolaniques sont aussi caractérisés par une CEC élevée. Lors de la deuxième étape, la résistance  $R_c$  augmente plus rapidement, suivant en cela l'évolution de la CEC.

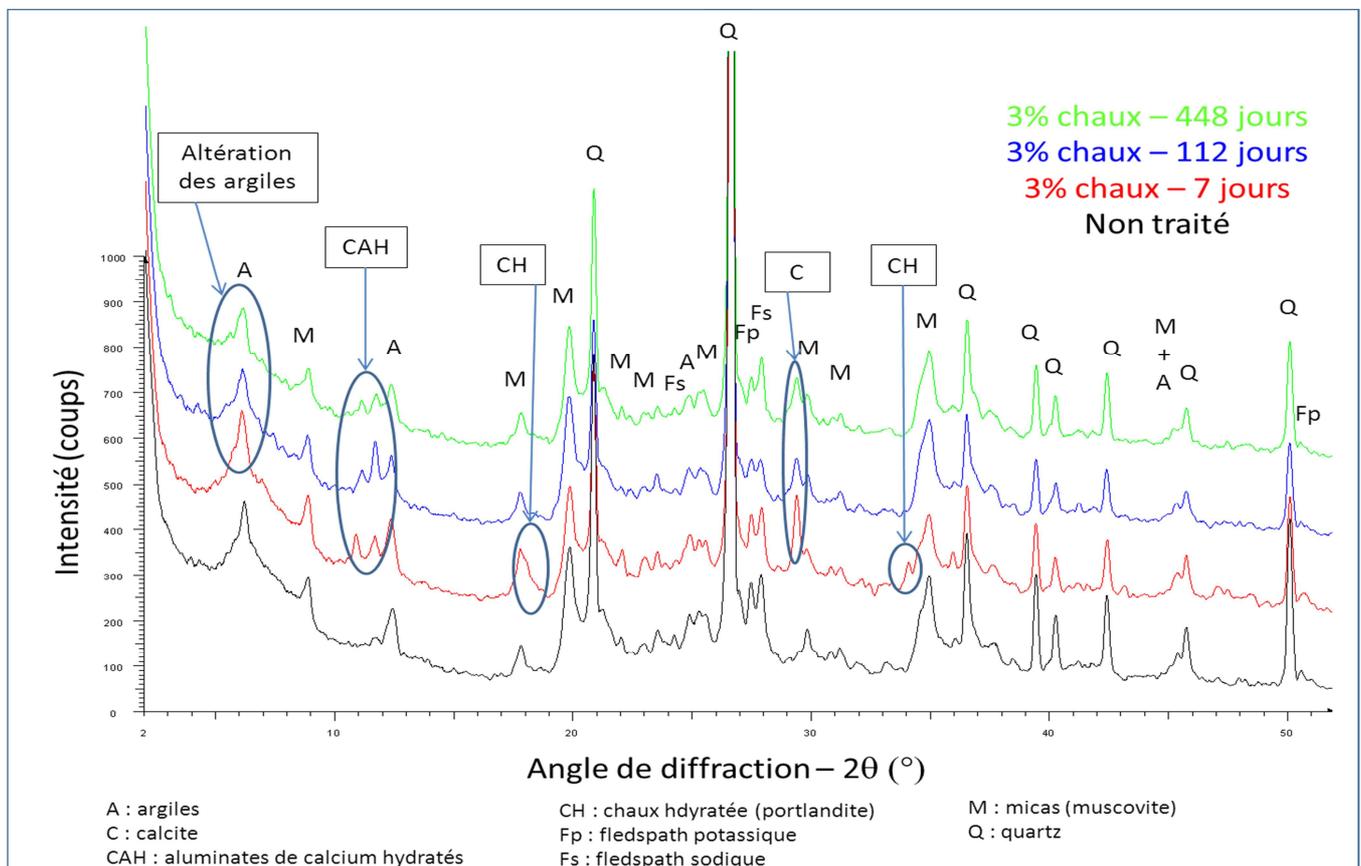


Figure 9. DRX du sol de MLD non traité et traité à 3% de chaux après 7, 112 et 448 jours.

Afin de mieux suivre l'altération des minéraux présents dans le sol et l'apparition de nouveaux composants résultant du traitement à la chaux, une série de diffractogrammes de rayons X a permis de qualifier les minéraux (fraction < 2 µm) présents dans le sol de MLD naturel ainsi que le sol traité après 7, 112 et 448 jours (figure 9).

Les essais effectués directement après traitement (7 jours de cure), montrent l'apparition de nouveaux composés appartenant à la famille des CAH. Ceux-ci peuvent expliquer partiellement l'augmentation des propriétés mécaniques durant la première étape d'évolution.

La présence de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , forme de chaux hydratée) et de calcite, résultant probablement de la carbonatation de la chaux hydratée au cours de la procédure d'essai, indiquent qu'à ce moment il reste encore de la chaux disponible. Après 112 jours, les pics correspondant à la calcite ont diminué d'intensité et ceux correspondant à la portlandite ne sont plus visibles : le manque de chaux disponible à ce moment reflète que l'augmentation de résistance lors de la seconde étape résulte d'un autre processus. Les CAH formés après 7 jours de cure sont toujours présents mais semblent faire l'objet d'un réarrangement structurel en fonction du temps de cure. Il est aussi possible d'observer une attaque de la fraction argileuse, d'autant plus importante avec le temps de cure, qui pourrait avoir donné naissance à des CSH peu ou mal cristallisés et ne présentant donc pas de pics de diffraction bien distincts. Les autres minéraux ne semblent pas affectés par les réactions sol-chaux.

#### 4. Conclusions

L'amélioration des propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux se poursuit dans le temps pour des temps de cure supérieurs à 730 jours. Cette augmentation de résistance mécanique peut être attribuée principalement à un accroissement de cohésion dont il faut souligner l'effet bénéfique pour les applications géotechniques. Les résultats de l'étude ont aussi montré que, même après la saturation des éprouvettes entraînant une perte de cohésion apparente, la cohésion induite par la 'cimentation' due à l'apport de chaux est quant à elle conservée.

Cette étude sur le long terme a permis de mettre en évidence que l'évolution n'est pas linéaire mais comporte différentes étapes distinctes, deux pour ce type de sol limoneux dans les conditions étudiées.

Les essais de granulométrie par sédimentométrie et par diffraction laser permettent de mettre en évidence une évolution de la texture du matériau : l'ajout de chaux amène une floculation et une granulation des particules qui se poursuit avec le temps de cure. La formation de liaisons fortes entre particules, qu'un défloculant ne peut séparer en particules élémentaires, entraîne l'apparition de granulats de dimensions supérieures à celles présentes dans le matériau non traité. Les modifications de la distribution porale avec le temps de cure indique aussi que le sol traité subit des changements au niveau de sa structure. L'augmentation de cohésion du matériau peut donc être expliquée par l'analyse des caractéristiques physiques à l'échelle des particules du matériau.

L'ajout de chaux rend le milieu fortement basique, ce qui altère les minéraux argileux libérant de la silice et de l'alumine en solution qui vont réagir avec le calcium disponible pour former des CSH et CAH. La première étape d'évolution est donc liée à une consommation de chaux importante, bien que l'augmentation de résistance soit plus marquée encore lors de la deuxième étape qui débute lorsque le pH commence à diminuer et que la chaux disponible se réduit. Le développement des produits pouzzolaniques à des temps de cure plus importants apporte alors une cohésion importante au sol traité.

Cette recherche souligne l'intérêt de procéder à une étude multi-échelle du traitement des sols à la chaux, permettant de mieux comprendre les différents processus de l'évolution des propriétés mécaniques des sols traités à long terme.

#### 5. Remerciements

Les résultats présentés dans cet article sont issus du projet COGESTAC réalisé à l'Université Libre de Bruxelles (Belgique) et à l'Universidade do Minho (Portugal), avec LHOIST R&D comme partenaire industriel, et financé par le Fonds Social Européen (FSE) et par la Direction Générale pour la Technologie, la Recherche et l'Energie (DGTRE) du Ministère de la Région Wallonne (Belgique).

## 6. Références bibliographiques

- Bollens Q., Verhelst F., Verbrugge J.C., (2003) Evolutive van de geomechanische Karakteristieken van kalk behandelde grond, *Geotechniek* Vol 7 n°3, pp 78- 84.
- Bollens Q., Verbrugge J.C. (2005) Time dependant evolution of the shear strength of a silty soil treated with lime, *Article n°C008, Symposium TREMTI, Association Mondiale de la Route (AIPCR), Paris.*
- Cabane N. (2006) "Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation". *Thèse de doctorat - Ecole Supérieure Nationale des Mines de Saint-Etienne (France).*
- De Bel R. (2006) "Etude des sols traités à la chaux, à l'échelle microscopique et à l'échelle macroscopique". *Thèse de DEA, Université Libre de Bruxelles.*
- De Bel R. (2008) Analises macro do comportamento mecânico e hídrico de solo-cal, *Seminário Sobre Tratamento de Solos com Cal, Lisbonne (Portugal), 28-29/02/2008.*
- De Bel R., Bollens Q., Gomes Correia A., Duvignaud P.H., Verbrugge J.C. (2007) Time and temperature dependency of the geomechanical properties of silty soils treated with lime, *Proc. Int. Conf. on Advance Characterization of Pavment and Soil Materials, Athènes, Taylor & Francis / Balkema, Vol 1, pp 513-521.*
- De Bel R., Gomes Correia A., Verbrugge J.C. (2009) Contribution of loamy soil treatment to improve embankments performance, *ASCE Geotechnical Special Publication No. 189, pp 186-191.*
- Eades J.L., Grim R.E. (1960) A quick test to determine lime requirements for soil stabilisation, *Highway Research Record N°139*
- Little D. (1995) Stabilization of pavement subgrade and base courses with lime, *Kendall/Hunt Publishing Compagny, Dubuque, Iowa, USA, 219p.*
- Perret P. (1979) Application pratique des nouvelles données expérimentales relatives à la stabilisation des sols fins par la chaux *Bull. Liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°99, pp 110-118.*
- Robbe D., Roger B. (1987) Graulométrie des éléments fins par diffraction laser – Présentation et évaluation de la méthode, *Bull, liaison Labo P. et Ch., n°148, pp 13-23.*
- SETRA-LCPC (1992) Guide technique – Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR), *SETRA – Laboratoires des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris.*
- Verbrugge J.C., De Bel R., Gomes Correia A., Duvignaud P.H., Herrier G. (2011) Strength hand micro observations on a lime treated silty soil, *Geotechnical Special Publication No. 223, ASCE.*
- Verhasselt A. (1978) Stabilisation à la chaux (Traitement des sols cohésifs humides par la chaux – I), *Rapport de Recherche n°176/VA/1978, Centre de Recherches Routières (CRR), Bruxelles, Belgique.*