

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Effets de composés chimiques sur le traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique

## Effects of deleterious chemical compounds on soil stabilization

T. Le Borgne

*Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France*

O. Cuisinier

*Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages, Nancy-Université, France*

D. Deneele

*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France*

F. Masrouri

*Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages, Nancy-Université, France*

### RÉSUMÉ

Cette étude cherche à déterminer si certains composés chimiques employés à des concentrations rencontrées dans certains sols peuvent être considérés comme perturbateur de prise lors du traitement des sols. Les résultats montrent que certains composés peuvent diminuer l'efficacité d'un traitement mais sans rendre le sol inapte au traitement. L'effet de chaque composé dépend à la fois de sa concentration mais aussi du type de liant.

### ABSTRACT

A study was undertaken in order to determine the potential detrimental effect of several chemical compounds on soil stabilization with lime and binders. The results showed that despite these compounds may alter the efficiency of soil treatment the performance of the treated soil is still satisfactory. Moreover, it appeared that the effect of each chemical compound is a function of the soil nature, the type of binder, etc. Thus, it is not possible to determine a single threshold value valid for all types of soil.

Keywords : soil stabilization, lime, binder, chemical compounds

## 1 INTRODUCTION

L'évolution actuelle du contexte socio-économique dans le domaine des terrassements est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques, notamment mécaniques, sont très faibles. Il est possible d'améliorer ces matériaux par un traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique. Dans certains cas cependant ce type de traitement est inefficace, une des raisons avancées étant la présence d'éléments chimiques perturbateurs. De nombreux éléments sont ainsi mentionnés comme perturbateurs potentiels du traitement des sols dans le guide français pour le traitement des sols (LCPC-SETRA, 2000). Il s'agit surtout d'anions tels que les sulfates, les phosphates, les chlorures ou encore les nitrates. Dans la littérature, il existe de nombreuses études montrant que les sulfates peuvent avoir une action négative sur le traitement des sols (Mitchell 1986, Hunter 1988, Wild 1999). Les travaux sur les autres éléments mentionnés par le guide de traitement des sols sont assez rares (par ex. Guichard 2006 pour les nitrates). Bien que mentionnés dans le guide du traitement, l'effet de nombreux éléments chimiques reste ainsi encore en question. En dehors d'une identification précise de ces perturbateurs, il convient aussi d'aborder la notion de concentration à partir de laquelle chaque élément peut avoir un impact significatif sur le traitement. En effet, les études sur les seuils de perturbation sont rares, sauf dans le cas du soufre (Sherwood, 1962) où plusieurs auteurs ont travaillé sur les seuils sans pouvoir les mettre en évidence de façon absolue.

Dans ce contexte, cette étude vise à contribuer à l'identification des éléments chimiques perturbateurs de la prise et leur seuil d'influence respectif potentiel. Pour réaliser ces travaux, il a été choisi de travailler sur un sol naturel qui ne contient pas d'éléments chimiques supposés perturbateurs. Ce sol a été mélangé avec les perturbateurs potentiels à des concentrations connues, l'efficacité du traitement étant évaluée ensuite. Cette procédure a été préférée à l'utilisation de sols naturels reconnus inaptes au traitement. En effet, comme l'a

montré Cabane (2005) un sol naturel peut contenir plusieurs éléments perturbateurs. Ceci induit des difficultés à identifier le mode d'action d'un élément particulier et donc de déterminer les causes exactes de la perturbation. Dans ce contexte, nous avons dans un premier temps, étudié les effets, sur un sol limoneux, de quatre composés chimiques souvent rencontrés dans les sols : le sulfate de calcium, le chlorure de sodium, le phosphate de potassium, et le nitrate d'ammonium. L'influence des conditions de cure sur l'expression des composés chimiques a ensuite été étudiée.

## 2 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Le sol sélectionné pour cette étude est un limon prélevé à Magny le Hongre (Est de Paris). Les analyses chimiques ont confirmé que le sol ne contient aucun composé chimique supposé perturbateur. Ce sol a une limite de liquidité de 36.5% et un indice de plasticité de 15,7 %. Les caractéristiques de compactage ont été déterminées par l'essai Proctor normal, avec un teneur en eau optimale de 15,5 % pour une masse volumique sèche de 1,80 Mg.m<sup>-3</sup> (Le Borgne et al., 2008)).

Une attention particulière a été apportée au choix des concentrations en éléments chimiques ajoutés dans le sol. En effet, il est important que les concentrations retenues soient représentatives de celles rencontrées naturellement dans les sols couramment utilisés dans le domaine des terrassements. Elles ont été déterminées à l'aide des bases de données de différents instituts de recherche français (Tableau 1). Deux concentrations ont été choisies pour chaque élément : la première correspond à la valeur moyenne retrouvée dans les sols français, la seconde, correspond à une valeur maximale qu'il est possible de rencontrer en France (Le Borgne et al., 2008).

Le dosage choisi pour l'étude est de 1,5 % de chaux vive et 6 % de liant hydraulique qui est un traitement classique pour ce type de sol pour une utilisation en couche de forme. La chaux vive utilisée possède un taux de chaux libre très important (91%). Deux liants hydrauliques ont été considérés. Le premier

liant (CEM I 52,5 N) est un ciment à base de clinker (95 %). Le deuxième liant (CEM II 32,5 R) contient moins de clinker (70 %) et un filler calcaire comme constituant secondaire.

Tableau 1. Concentrations des éléments chimiques utilisés pour l'étude.

Éléments étudiés	Dosage minimum	Dosage maximum
Composés soufrés (CaSO <sub>4</sub> )	0,71 gSO <sub>4</sub> /kg	7,1 gSO <sub>4</sub> /kg
Fertilisants azotés (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )	0,156 mgNO <sub>3</sub> /kg	1,56 mgNO <sub>3</sub> /kg
Fertilisants Phosphatés (KPO <sub>4</sub> )	0,283 mgPO <sub>4</sub> /kg	0,850 mgPO <sub>4</sub> /kg
Composés chlorés (NaCl)	0,06 mg/kg	1,2 mg/kg

Tableau 2. Critères d'aptitude (LCPC/SETRA, 2000)

Gonflement volumique Gv (%)	Résistance par fendage Rtb (MPa)	Aptitude au traitement
≤ 5	≥ 0,2	Apte
5 ≤ Gv ≤ 10	0,1 ≤ Rtb ≤ 0,2	Douteux
≥ 10	≤ 0,1	Inapte

### 3 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

#### 3.1 Apport des éléments chimiques au sol

La procédure mise en œuvre pour mélanger le composé chimique avec le sol provient de pratiques écotoxicologiques (Normes ISO 11268 et ISO 11269). Cette procédure favorise une répartition homogène du composé chimique dans le sol (Ribera 1998). La mise en œuvre de cette procédure dans le cadre de cette étude induit quatre étapes de préparation :

- 1- le composé chimique est dissous dans de l'eau distillée ;
- 2- la solution et le sol sont mélangés ;
- 3- le mélange est laissé au repos pour 2 semaines ;
- 4- le sol est humidifié à la teneur en eau de compactage.

#### 3.2 Essais mécaniques

Le guide du traitement des sols (LCPC-SETRA, 2000) recommande plusieurs essais pour déterminer l'aptitude ou non d'un sol vis-à-vis d'un traitement. Deux essais ont été retenus pour cette étude : l'essai d'aptitude au traitement et la résistance à la compression simple.

L'essai d'aptitude consiste à mesurer le gonflement et la résistance à la traction indirecte d'éprouvettes de sol traité après une période d'immersion de 7 jours à 40°C. Les critères utilisés pour déterminer l'aptitude du sol au traitement sont indiqués dans le Tableau 2.

Pour les essais de résistance à la compression simple, les éprouvettes sont conservées de deux manières différentes après compactage. Certaines sont conservées à teneur en eau constante à 20°C. Dans ce cas, les résistances à la compression simple sont déterminées à différents temps de cure (3 h, 1, 7, 28, 60, et 90 jours). D'autres éprouvettes sont conservées à teneur en eau constante à 20°C pendant 28 jours, puis immergées dans un bain à 20°C pendant 32 jours. À l'issue de la période de conservation, la résistance à la compression simple est déterminée. Ensuite, le rapport (Ri) entre la résistance à la compression simple mesurée après 60 jours de cure à teneur en eau constante et la résistance après 60 jours de cure avec une immersion est déterminé. Ce rapport doit être supérieur à 0,6 pour confirmer l'efficacité du traitement.

Pour tous les essais, les éprouvettes doivent être confectionnées par compactage statique avec un objectif de 98,5 % de la densité obtenue à l'optimum Proctor normal. Les

références de compactage de tous les échantillons sont une masse volumique sèche de 1,64 Mg.m<sup>-3</sup> et une teneur en eau de 20 %, teneur en eau optimale du sol traité. Ces valeurs ont été respectées pour tous les mélanges considérés dans l'étude.

### 4 INFLUENCE DE COMPOSÉS CHIMIQUES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

#### 4.1 Résultats

Les résultats sont présentés sur la Figure 1 pour le traitement au CEM I et la Figure 2 pour le traitement au CEM II. De nombreux essais ont été réalisés dans le cas du sol traité sans éléments chimiques de manière à évaluer la répétitivité des essais. On constate ainsi que dans la majorité des cas, quel que soit le liant employé, l'ajout d'un perturbateur n'altère pas de manière significative l'efficacité du traitement, les résultats étant compris dans la gamme d'incertitude des essais définie à partir du limon seul. Les caractéristiques mécaniques du sol sont peu modifiées par l'ajout de composés chimiques. Par exemple, les résistances à la compression simple baissent de 29% à 90 jours lorsque l'on ajoute un fertilisant comme le phosphate à forte concentration, mais elles restent satisfaisantes pour envisager l'emploi du matériau. On remarque qu'il n'y a aucune influence significative du sulfate sur la résistance à la compression simple du limon dans le cas d'un traitement au CEM I. L'ajout de chlorure aux concentrations choisies ne modifie pas les caractéristiques de notre matériau.

Les tableaux 3 et 4 donnent les résultats de résistance à la compression simple après immersion pour les mélanges de limon et de sulfate. Les rapports Ri sont satisfaisants et les gonflements volumiques sont acceptables en regard des critères d'aptitude définis dans le guide du traitement des sols.

Les tableaux 3 et 4 donnent aussi les résultats des essais d'aptitude pour les mélanges LVE et sulfate. Il apparaît que les caractéristiques du sol ne sont pas significativement modifiées pour la faible concentration en sulfates. En revanche, l'ajout de sulfate au dosage maximum entraîne une augmentation du gonflement volumique. Dans le cas du traitement au CEM II, le mélange limon + sulfate à forte concentration est déclaré comme inapte au traitement (Gv > 10%, voir tableau 2).

Tableau 3. Résultats de l'essai d'aptitude et de résistance à la compression au jeune âge pour le mélange limon + sulfate traité à 1,5% de chaux et 6% de liant hydraulique de type CEM I.

	Essai d'aptitude		Résistance à l'immersion au jeune âge	
	Gonflement volumique (%)	Rtb (MPa)	Ri	Gonflement volumique (%)
LVE	0,4	0,511	0,85	0,1
LVE + faible [sulfate]	0,5	0,607	0,86	0,1
LVE + forte [sulfate]	3,5	0,636	0,82	1,5

Tableau 4. Résultats de l'essai d'aptitude et de résistance à la compression au jeune âge pour le mélange limon + sulfate traité à 1,5% de chaux et 6% de liant hydraulique de type CEM II.

	Essai d'aptitude		Résistance à l'immersion au jeune âge	
	Gonflement volumique (%)	Rtb (MPa)	Ri	Gonflement volumique (%)
LVE	0,5	0,439	0,87	0,3
LVE + faible [sulfate]	0,3	0,532	0,86	0,2
LVE + forte [sulfate]	13,3	0,364	0,93	2,1

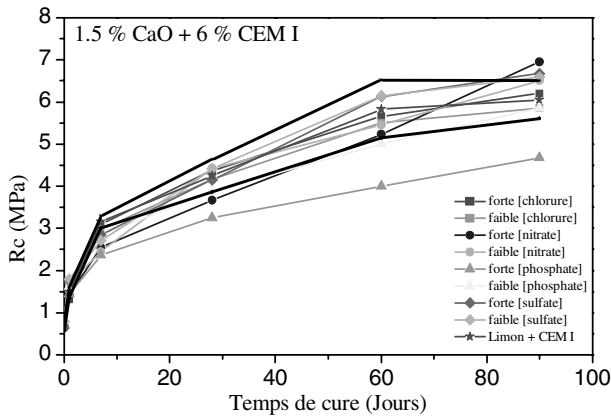


Figure 1. Résistances à la compression simple en fonction du temps du limon traité à la chaux et au CEM I, perturbé ou non. Les courbes noires indiquent l'écart type calculé sur 10 mesures pour le limon traité.

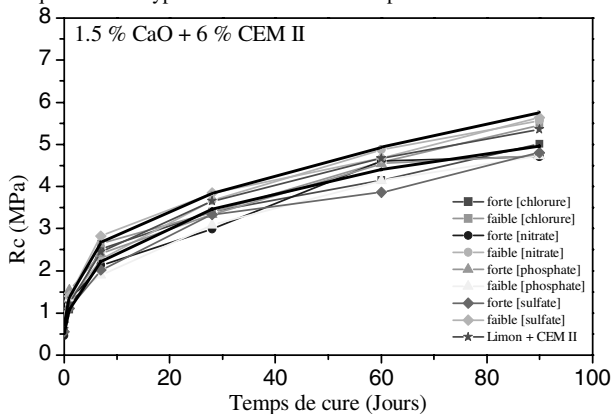


Figure 2. Résistances à la compression simple en fonction du temps du limon traité à la chaux et au CEM II, perturbé ou non. Les courbes noires indiquent l'écart type calculé sur 10 mesures pour le limon traité.

#### 4.2 Conclusion

Dans les conditions retenues pour cette étude, les éléments chimiques testés hormis les sulfates, ne constituent pas un obstacle à un traitement efficace des sols. Si pour certaines des conditions étudiées, une altération des effets du traitement est observée, la performance mécanique du matériau est encore largement satisfaisante pour une utilisation en terrassement. Les concentrations utilisées étant des concentrations maximales pour les sols en France, la présence seule de ces éléments ne semble pas être à même d'expliquer l'échec du traitement dans certains cas observés sur chantier. La présence de ces éléments chimiques à ces concentrations n'exclue pas l'utilisation du sol pour des travaux de terrassements.

Les résultats obtenus dans le cas de l'ajout de soufre permettent aussi de mettre en évidence l'importance des conditions d'essais sur la mise en évidence de l'effet potentiel d'un élément chimique, et des critères utilisés pour décider de la réussite ou non d'un traitement à la chaux et / ou au ciment. En effet, pour la concentration maximale considérée, certains essais mettent en évidence un échec du traitement (tableau 4), alors que d'autres non. Il est donc difficile, dans un cas général, de déterminer si un élément est perturbateur ou non du traitement des sols en se basant uniquement sur sa nature et sa concentration dans le sol. Les résultats des essais de laboratoire montrent qu'il est indispensable de prendre en compte à la fois les propriétés du sol, la nature et la concentration de l'élément chimique, ainsi que les conditions d'essai.

## 5 INFLUENCE DES PARAMETRES D'ESSAIS

La première partie de l'étude a mis en évidence les contradictions qui peuvent émerger lorsque différents types

d'essais sont mis en œuvre pour juger de la réussite d'un traitement. Ceci est notamment le cas lorsque du soufre est ajouté dans le sol. Dans une seconde partie d'étude, l'influence de différents paramètres d'essais a été évaluée de manière indépendante.

#### 5.1 Influence de la température à teneur en eau constante

Les résistances à la compression simple pour le limon contenant des éléments chimiques ou non sont mesurées sur des échantillons ayant subi une cure de 40°C et à teneur en eau constante (Figure 3). On constate que la température accélère la cinétique de prise, les résistances atteintes à 20°C à long terme, après 90 jours (Figure 2) sont similaires à celles atteintes à 40°C après 14 jours. Cependant, les caractéristiques mécaniques du sol contenant l'élément soufré sont significativement supérieures à celle du limon seul, la température tend à augmenter la résistance à la compression simple maximale du mélange limon plus sulfate.

#### 5.2 Influence des conditions de l'immersion

Une des différences majeures entre les procédures d'essais suivies lors de la première partie de l'étude est la présence ou non d'eau au cours de la cure. Dans ce cadre, l'influence des conditions d'immersion a été considérée.

La résistance à la compression simple a été déterminée à partir d'échantillons ayant subi une immersion dans une eau soit à 20°C (figure 4) soit à 40°C (figure 5). L'immersion des éprouvettes, à 20°C, de mélange limon plus sulfate provoque leur gonflement (25% à 14 jours d'immersion). Les résistances à la compression simple chutent dès les premiers jours, elles sont équivalentes aux résistances du limon non traité. Les éprouvettes immergées à 40°C de mélange limon plus sulfate gonflent moins que celles immergées à 20°C, environ 15% après 2 jours d'immersion. Malgré ce gonflement, les résistances à la compression simples atteignent environ 2 MPa à 14 jours d'immersion.

L'influence du délai entre le compactage et l'immersion des éprouvettes a aussi été prise en compte. Les résistances à la compression simple ont été mesurées sur des échantillons ayant subi une cure à teneur en eau constante pendant 7 jours à 20°C et immergés dans une eau à 40°C (figure 6). Ces essais doivent être comparés aux résultats de l'essai d'aptitude classique (Tableaux 3 et 4). L'immersion des éprouvettes, à 40°C, de mélange limon plus sulfate provoque un gonflement inférieur à 5%. Les résistances à la compression simple sont alors équivalentes aux résistances du limon non perturbé traité. Ces essais montrent que la période initiale de cure avant l'immersion de l'éprouvette est déterminante. L'effet négatif du sulfate ne se manifeste par un gonflement et une chute des performances que lorsque le délai entre la préparation et l'immersion est court, ce qui correspond à la modalité de l'essai d'aptitude classique.

#### 5.3 Conclusions

Différents essais existent pour évaluer l'aptitude d'un sol à un traitement à la chaux et / ou au ciment. L'utilisation simultanée de ces essais peut conduire à des résultats contradictoires, notamment lorsque des éléments soufrés sont présents dans le sol. Les essais réalisés lors de cette deuxième partie de l'étude montrent que l'augmentation seule de la température de cure ne semble pas nuire au traitement d'un sol contenant des sulfates. En effet, les performances observées à quelques jours de cure à 40°C sont plus fortes que celles observées à long terme à 20°C. La disponibilité en eau pour les échantillons de limon plus sulfate, par immersion, se traduit par un gonflement, et une baisse des caractéristiques mécaniques du sol. Ce phénomène est plus marqué quand le sol est immergé à 20°C, en effet l'augmentation de température semble permettre à la prise de se

réaliser, ainsi les échantillons gonflent moins et acquièrent une certaine résistance. Enfin, lorsque l'on augmente la cure avant immersion, on réduit fortement les gonflements et la prise a lieu comme sur le matériau de référence.

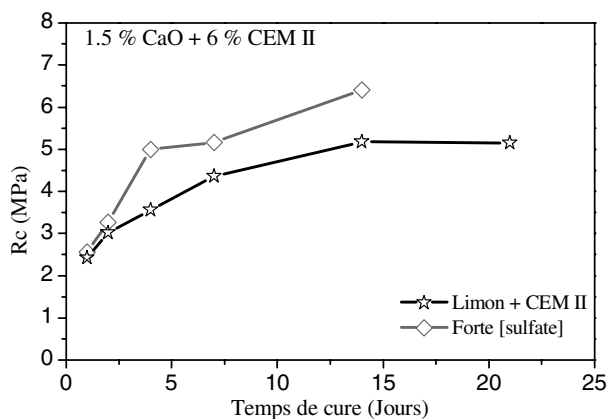


Figure 3. Résistances à la compression simple en fonction du temps d'échantillons ayant subi une cure à teneur en eau constante et à une température de 40°C.

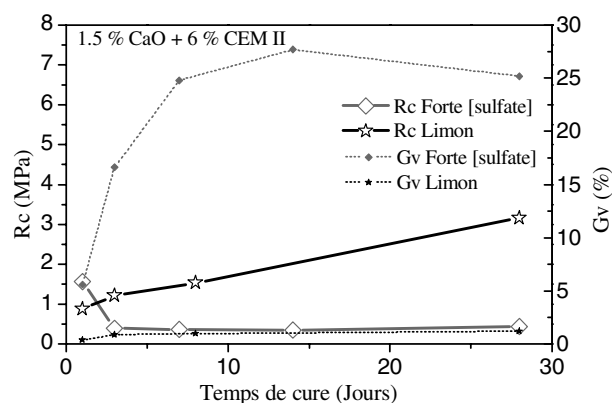


Figure 4. Résistances à la compression simple en fonction du temps d'échantillons ayant subi une immersion à 20°C.

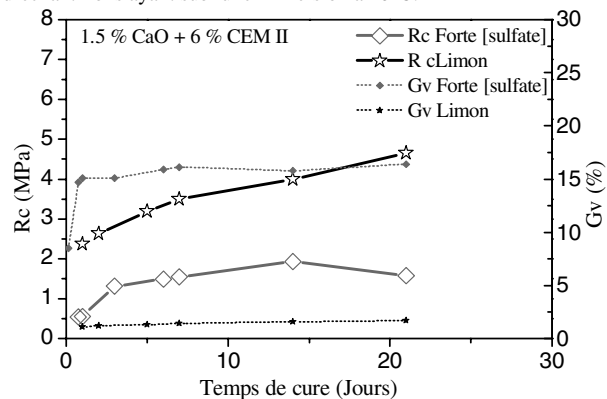


Figure 5. Résistances à la compression simple en fonction du temps d'échantillons ayant subi une immersion à 40°C.

## 6 CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Dans la première partie de l'étude on a pu mettre en évidence l'importance du système sol, liant, perturbateurs, pour évaluer l'aptitude d'un sol à un traitement. Dans nos conditions expérimentales, le chlorure n'a aucun effet sur le traitement des sols, les fertilisants (nitrates et phosphates) peuvent affecter l'efficacité du traitement, la performance du sol restant cependant satisfaisante.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence la difficulté de choisir un essai pour évaluer l'aptitude d'un sol contenant du sulfate. En effet, les conditions de cure varient beaucoup d'un essai à l'autre, et chaque paramètre influe sur le résultat, et donc sur le résultat final concernant la possibilité de mener à bien un traitement sur un sol donné. L'analyse des résultats de la deuxième partie de l'étude consacrée au cas du soufre montre que l'essai d'aptitude semble donc très pénalisant lorsque le sol contient du sulfate. En effet, une immersion peu de temps après le compactage favorise le gonflement des échantillons et ainsi réduit le gain de résistance. Les conditions de cure de cet essai sont trop pessimistes par rapport à la réalité de vie des ouvrages en sols traités. En effet, ils n'ont pas tous vocation à être immergés immédiatement. Se pose donc la question de savoir si des sols contenant du sulfate peuvent être utilisés en terrassement en prenant les dispositions nécessaires. Les essais de résistance à la compression simple sur des échantillons conservés un certain temps à teneur en eau constante, donnent ainsi des résultats satisfaisants, indépendamment de la température, avec des conditions d'essais qui s'approchent plus de la réalité.

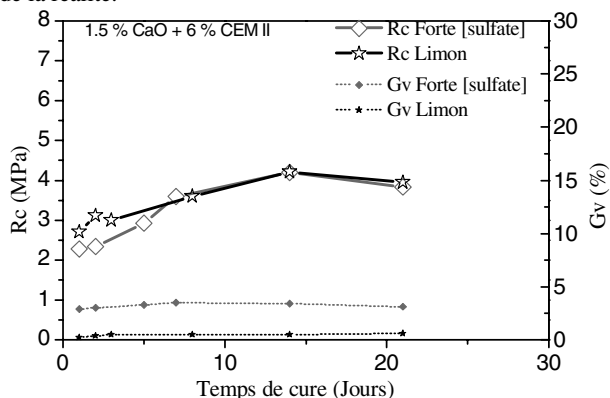


Figure 6. Résistances à la compression simple en fonction du temps d'échantillons ayant subi une immersion à 40°C, après une précure à teneur en eau constante et à 20°C pendant 7 jours.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cabane, N., Nectoux, P., Gaudon, P. & Fouletier, M. (2005). Contribution to study of sulphur damages on treated soils. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium of treatment and recycling of materials for transport infrastructure*, Paris. 182 p.
- Guichard, C. (2006). Eléments perturbateurs de la prise dans les sols traités aux liants hydrauliques : définition, détection, seuils et remèdes. *Master of sciences*, INSA Strasbourg.
- Hunter, D., (1988). Lime induced heave in sulphate bearing clay soils. *Journal of geotechnical engineering*, 114 : 150-167.
- LCPC – SETRA. (2000). Soil treatment with lime and/or hydraulic binders. *Technical guide*. ISSN: 1151-1516. 240 p.
- Le Borgne, T., Cuisinier, O., Deneele, D., Masroui, F. (2008). Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilisation. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on transportation geotechnics*, Nottingham, UK, 25, 657-663.
- Mitchell, J.K. (1986). Practical problems from surprising soil behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 112: 259-289.
- Ribera, D. & Saint Denis, M. (1999). The worm *Eisenia fetida*: interests and perspectives in terrestrial ecotoxicology. *Bull Soc. Zool. Fr.*, 124 (4): 411-420.
- Sherwood, P.T. (1962). Effect of sulphate on cement and sulphate treated soils. *Highways Res. Board Bul.* 353, 98-107.
- Wang, W., Roy, A., Seals, R. K., and Metcalf, J. B. (2003). Stabilization of Sulfate-Containing Soil by Cementitious Mixtures Mechanical Properties. *Transportation Research Record* (1837), 12-19.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. & Higgins, D.D., (1999). Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag. *Eng. Geol.* 51, 257-277.