



HAL
open science

Influence des modalités de préparation de l'argile d'Héricourt traitées à la chaux et au ciment sur leur comportement mécanique

Andry Razakamanantsoa, Jean Pierre David, Erwann Rayssac

► To cite this version:

Andry Razakamanantsoa, Jean Pierre David, Erwann Rayssac. Influence des modalités de préparation de l'argile d'Héricourt traitées à la chaux et au ciment sur leur comportement mécanique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012, Jul 2012, France. 8p. hal-00958888

HAL Id: hal-00958888

<https://hal.science/hal-00958888>

Submitted on 13 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DES MODALITES DE PREPARATION DE L'ARGILE D'HERICOURT TRAITÉES A LA CHAUX ET AU CIMENT SUR LEUR COMPORTEMENT MECANIQUE

EFFECT OF SAMPLE MIXING OF HERICOURT CLAY TREATED BY LIME AND CEMENT ON ITS MECHANICAL BEHAVIOUR

Andry RAZAKAMANANTSOA, Jean-Pierre DAVID, Erwann RAYSSAC,

Institut Français des Sciences, et Technologies, des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux – GER 8 -Terrassements et Ouvrages en Terres, Nantes, France

RÉSUMÉ — Le comportement mécanique des ouvrages en terre construits avec du sol traité aux liants est intimement lié à l'organisation de la microstructure qui résulte des opérations à la fois de traitement et de compactage. Parmi les nombreux paramètres pouvant influencer cette organisation, on s'est intéressé aux conditions de préparation du sol avec le liant. Dans ce contexte, nous avons étudié l'importance de l'homogénéité de la mouture, selon les modalités de préparation, sur le comportement mécanique du sol traité. Ainsi, dans le cas de l'argile d'Héricourt (70), il a été constaté que la durée de malaxage a une influence directe sur la nature de traitement de l'argile. Une durée de malaxage plus longue entraîne une augmentation du coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) de la mouture, tandis que le coefficient de courbure granulométrique ($C_c = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$) de la mouture reste peu influencé. L'introduction de $R = (D_{60} - D_{10}) / (D_{30} - D_{10})$ permet de montrer l'influence de la qualité de la mouture sur l'évolution de la densité et également sur les paramètres mécaniques comme la résistance à la compression simple et le module d'élasticité, et sur les paramètres hydriques. Les séries d'observation à la microfluorescence X ont confirmé l'évolution de la qualité d'organisation granulaire de la mouture selon le type de malaxage.

ABSTRACT — Mechanical behaviour of earthwork built with bonded clay soil is linked intimately to its microstructure organization related to the treatment and compaction. This study is devoted to analyze the effect of the homogeneity of treated sample preparation on its structure and mechanical behaviour. In case of the clay of Héricourt, by using similar granulometry analysis as to the granular soil, it was observed that, mixing duration lead to increase the $C_u = D_{60}/D_{10}$ of the clods, but less affects the $C_c = D_{30}^2 / (D_{60} \times D_{10})$ of clods size distribution. $R = (D_{60} - D_{10}) / (D_{30} - D_{10})$ is introduced to highlights the effect of the quality of clods on to the evolution of the dry weight and also to shows how important is the effect of clods distributions on the change of the uniaxial compression strain and the young modulus of the sample. μ -XRF Spectrometer analysis confirmed the evolution of the quality of clods distribution as a function of the mixing process.

1. Introduction

Depuis quelques décennies le traitement de sol a pris sa place dans le domaine du terrassement et des ouvrages en terres. Des travaux de recherches ont été menés pour

tenter de comprendre les mécanismes qui s'opèrent au niveau de l'organisation microstructurale des matériaux plastiques fortement remaniés (Delage *et al.*, 1996; Bin *et al.*, 2007; Ferber *et al.*, 2008; Cuisinier *et al.*, 2008; Le Runigo *et al.*, 2009). Bin *et al.* (2007), ont montré que l'ajout de chaux augmente le nombre de pores de diamètre supérieur à 0,02 μm , et diminue le nombre de pores inférieurs à 0,003 μm . A une échelle supérieure, Cuisinier *et al.* (2008), travaillant sur du limon traité, ont conclu que l'ajout de chaux entraîne une augmentation du nombre de micropores du sol de taille comprise entre 0,01 μm et 0,3 μm . Runigo *et al.* (2009) ont expliqué que la diminution de la densité du matériau traité à la chaux, à énergie de compactage égale, est due à la modification des pores de taille inférieure à 1 μm . Cette modification est le résultat de la floculation du sol sous l'effet de la chaux. La diminution de la densité s'explique aussi par le développement de micropores compris entre 0,01 μm et 0,2 μm . Ces micropores sont sensibles à la variation de l'état hydrique, mais sont très peu influencés par l'énergie de compactage. Une faible concentration en chaux n'a qu'une très faible influence sur le comportement hydraulique du matériau traité, sachant que l'écoulement hydraulique s'effectue préférentiellement dans les macropores supérieurs à 1 μm . Runigo *et al.* (2009), ont montré que le sous compactage favorise le lessivage de la chaux et diminue la durabilité du sol traité. Les résultats des études précitées exposent différents points de vue liés à l'échelle d'observation. Dans l'ensemble, les auteurs s'intéressent à l'état d'organisation microstructurale du matériau post compactage et son influence sur le comportement hydraulique et mécanique du matériau. L'originalité du présent article repose sur l'étude des corrélations entre l'organisation microstructurale et les modalités de malaxage du mélange de sol traité. L'objectif consiste à comprendre l'importance de la granulométrie de la mouture sur la compactibilité et la résistance mécanique du sol traité post compactage.

2. Procédure expérimentale

2.1. Matériau

Le matériau utilisé est une argile en provenance de Héricourt (Haute Saône, France). Son étude entre dans le cadre du projet ANR TERDOUEST. Des analyses par diffraction des rayons X montrent qu'elle est composée essentiellement d'illite et de vermiculite. Ses principales caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1 . Principaux caractéristiques de l'argile d'Héricourt

Identification				Granulometrie			Physico-chimique	
w_L (%)	I_p (%)	$\gamma_{d\text{ OPN}}$ (kN/m ³)	ω_{OPN} (%)	<400 (μm)	<80(μm)	<2(μm)	VBS	CaCO ₃ (%)
82.5	40	14.5	26,4	94	91	67	8.2	-

Trois types de mélanges traités ont été choisis afin de mettre en évidence l'influence du malaxage : un traitement à la chaux à 2%CaO, un deuxième à 5%CaO et un traitement mixte chaux-ciment à 2%CaO et 3% CEM II 42,5 (noté Mixte par la suite). La chaux utilisée présente une surface spécifique de 1,672 m²/g (BET) et un poids volumique

granulaire de $3,22 \text{ g/cm}^3$ (à l'Hélium). Le ciment a une surface spécifique de $1,676 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET) et un poids volumique de $3,06 \text{ g/cm}^3$ (à l'hélium).

2.2. Matériels et Méthodes

2.2.1. Programme expérimental

Les expérimentations sont réalisées sur des éprouvettes d'argile traitée fabriquées avec différentes moutures ou granulométries. Deux types de mouture vont être préparés pour chaque mélange et seront qualifiés selon deux critères : l'homogénéité visuelle du mélange et la durée de malaxage. Deux types de malaxage ont été proposés. Le malaxage Court est obtenu lorsque les liants hydrauliques ne sont plus visibles dans le mélange. Le malaxage Long correspond quant à lui à un état d'homogénéisation suffisante de la mouture. L'analyse granulométrique de chacune des moutures est effectuée à sec à l'aide d'une série de tamis de 14, 10, 5, 4, 2, 1 mm d'ouverture. Afin d'étudier l'influence de la taille de la mouture initiale sur les caractéristiques de compactage, le compactage de l'argile traitée est réalisé à l'aide d'une mini dame Proctor (Ferber et al. 2008) et d'une cellule oedométrique ($\varnothing : 70 \text{ mm}$, $h : 19 \text{ mm}$). Ensuite, pour la détermination des paramètres mécaniques (résistance à la compression simple, module élastique après maturation de l'argile traitée), les éprouvettes ($\varnothing : 50 \text{ mm}$, $h : 100 \text{ mm}$) sont fabriquées avec une presse classique de 100kN. L'étape suivante consiste à observer la structure « granulaire » de l'argile compactée à l'aide de la micro-fluorescence X. Cette méthode permet de distinguer les éléments tels que le silicium et le calcium. La résolution de l'image est suffisante pour distinguer leur distribution dans la matrice granulaire de la mouture. Le traçage de l'ion calcium nous renseigne ainsi sur le mode de distribution des liants suivant le type de malaxage.

2.2.2. Préparation des matériaux

L'argile est d'abord séchée à température ambiante ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) pendant 3 jours, déstructurée et homogénéisée puis tamisée à 3,15 mm (Le Runigo et al., 2008). Le matériau est ensuite humidifié et homogénéisé à la teneur en eau de l'OPN du mélange avant de rajouter les liants. Cette opération est effectuée à l'aide d'un malaxeur Talsa K15 (50Hz) composé d'un bol tournant et de couteaux. Les durées de malaxage qui caractérisent le type de malaxage sont récapitulées dans le tableau 2. Deux vitesses de rotation (couteaux et bol) sont imposées successivement pour chacun des mélanges. Une première vitesse V1 (1420 tr/mn) permet d'accélérer le malaxage initial, puis une vitesse V2 (2840 tr/mn) permet d'assurer l'homogénéisation finale (tableau 2).

Tableau 2 . Durée de malaxage de l'argile d'Héricourt traitée (en seconde)

Type de malaxage	Vitesse	2%CaO	Mixte	5%CaO
Court	V1	20	10	25
	V2	10	5	0
Long	V1	45	30	60
	V2	10	10	15

Le traitement mixte, se fait en deux temps : traitement à la chaux en premier, suivi du traitement au ciment. Les matériaux, une fois utilisés, sont séchés par lyophilisation pendant 72 heures. Les vides inter-granulaires et inter-mottes sont ensuite remplis avec une résine pour faciliter l'observation. Chaque essai est répété au moins deux fois pour assurer une meilleure représentativité des données.

3. Résultats et analyses

Dans les études courantes de laboratoire ou sur chantier, l'appréciation de la qualité de la mouture se fait habituellement de manière visuelle et rapide. Peu de moyens analytiques simples sont disponibles pour quantifier l'homogénéité du mélange, et le passage des résultats de laboratoire vers le terrain reste délicat. Pour y remédier, on propose d'introduire un premier indicateur de comparaison afin de différencier les paramètres du matériau suivant le type de malaxage : $M = (P_L - P_C)/P_L$, avec, M : variation relative par rapport au malaxage Long, P_L : Paramètre correspondant au malaxage Long, P_C : Paramètre correspondant au malaxage Court. Le paramètre P peut être un paramètre d'identification ou un paramètre mécanique. Une valeur positive de M indique, pour sa part, l'apport positif du malaxage Long.

3.1. Distribution granulométrique de la mouture

La figure 1, représente la distribution granulométrique de la mouture de l'argile traitée (2% CaO ; 5% CaO, Mixte) selon les deux modes de malaxage : Long ou Court. Le malaxage Long permet d'augmenter la pente de la courbe granulométrique de la mouture, notamment avec le traitement à 5% CaO et le traitement mixte.

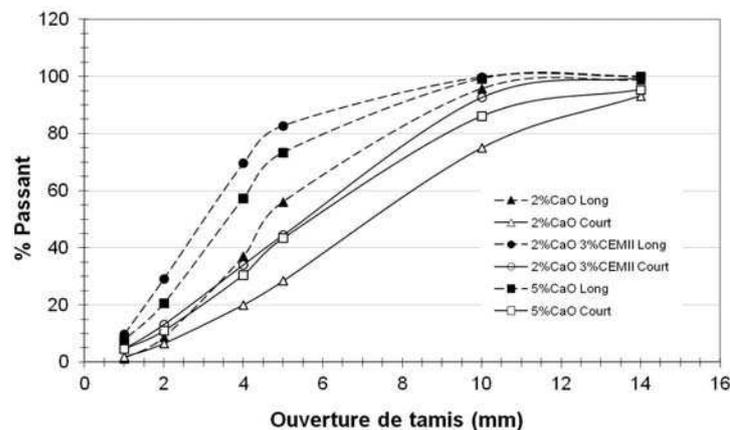


Figure 1: Courbe granulométrique de la mouture de l'argile d'Héricourt traitée

La courbe granulométrique de la mouture est d'autant moins étalée que l'ajout de liant est important en masse : 2% CaO < 5% CaO < Mixte. Soient D60, D30 et D10 les diamètres du tamis pour lequel le tamisat massique est respectivement égal à 60%, 30% et 10%. Le tableau 4 récapitule l'ensemble des paramètres caractéristiques de la courbe granulométrique de la mouture: coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / (D_{60} \cdot D_{10})$). Ces paramètres sont déduits directement des méthodes de caractérisation granulométrique classiques (NF P 94-056) correspondant à des grains

indéformables mais fragmentables. Ces paramètres seront utilisés pour qualifier la mouture, en donnant comme hypothèse provisoire, que cette dernière est formée par des agrégats indéformables.

Tableau 4 .Principales caractéristiques granulaires de la mouture de l'argile d'Héricourt

Matériau		2%CaO	Mixte	5%CaO
Cu	Court	3,63	3,71	3,43
	Long	2,61	3,5	3,32
Cc	Court	1,6	1,11	1,17
	Long	1,08	1,24	0,98

Les valeurs de Cu toutes supérieures à 2 caractérisent un étalement de la courbe granulométrique. Ces valeurs semblent diminuer avec la durée du malaxage. La classification LPC recommande par ailleurs, une valeur de Cc comprise entre 1 à 3 pour avoir une bonne répartition granulaire. Dans notre cas, les gammes de valeurs de Cc pour le malaxage Court et Long sont respectivement de $1,1 < Cc < 1,6$ et $0,98 < Cc < 1,24$. Les granulométries de la mouture sont donc bien graduées. La connaissance de l'évolution des deux coefficients Cu et Cc semble cependant insuffisante pour étudier l'influence de la durée du malaxage sur les caractéristiques granulométriques des mélanges.

3.2. Effet du malaxage sur la compactibilité du sol traité

Le tableau 5 récapitule les caractéristiques granulaires déduites de l'analyse granulométrique et des caractéristiques de compactage de l'argile d'Héricourt traitée. m et n désignent les deux pentes de la courbe granulométrique de la mouture (figure 1) comprises respectivement entre D60 et D10, et entre D30 et D10. La proportion des passants obtenue après malaxage est donc évaluée avec les paramètres m et n.

Tableau 5 . Caractéristiques de la mouture de l'argile d'Héricourt

Matériau	Type de malaxage	2%CaO	5%CaO	Mixte
m (D ₆₀ -D ₁₀)	Court	8,36	10,31	10,53
	Long	14,79	17,24	20
n (D ₃₀ -D ₁₀)	Court	6,23	10	11,11
	Long	14,4	19,8	18,52
R : (m/n)	Court	1,74	1,05	0,92
	Long	1,07	0,80	1,14
	M	-0,63	-0,32	0,20
Poids volumique (γ_d , kN/m ³) (Mini dame Proctor)	Court	13,2	13,85	13,09
	Long	12,71	12,86	14,42
	M	-3,86	-7,69	9,22

Le tableau 5 nous montre que m rend mieux compte de l'évolution de la granulométrie de la mouture en fonction du type de malaxage (figure 1). Par ailleurs, le malaxage Long permet d'augmenter la valeur de n comparée au malaxage Court (tableau 5). Pour une même concentration en liant, 5% de chaux, (M : 0,49) ou Mixte (M : 0,40), l'apport de la chaux combiné à un malaxage Long semble influencer le paramètre n. L'effet du type de

malaxage dans le cas du traitement mixte est plus contrasté. Ce résultat montre que m et n présentent des informations complémentaires. Alors, nous avons introduit le ratio $R = m/n$ dans le but de le corrélérer avec le poids volumique de chaque mélange. Nous avons énoncé quelques postulats sur les caractéristiques granulaires : pour augmenter la densité du mélange après compactage, on cherchera à diminuer m et augmenter n. Une faible valeur de $M(R)$ du mélange signifiera que le comportement du mélange est peu sensible à la durée de malaxage.

Le tableau 5 montre que le poids volumique de chaque éprouvette évolue avec le malaxage et le type de traitement. Le traitement à la chaux à 2% et 5% s'accompagne d'une diminution du poids volumique avec le malaxage, respectivement de $13,2 \text{ kN/m}^3$ à $12,71 \text{ kN/m}^3$, et de $13,85 \text{ kN/m}^3$ à $12,86 \text{ kN/m}^3$. Cependant, l'effet inverse est obtenu lorsqu'on utilise le traitement mixte ($13,09 \text{ kN/m}^3$ à $14,42 \text{ kN/m}^3$).

Une analyse combinée du paramètre R et de la variation du poids volumique du mélange de sol traité a par ailleurs été effectuée. Elle indique que l'évolution des poids volumiques avec le malaxage est en parfaite corrélation avec l'évolution de R. Ces résultats soulignent l'importance du paramètre R sur la qualification de la mouture.

3.3. Influence du mode de malaxage sur la résistance à la compression et le module d'élasticité à différent temps de cure

Le tableau 6 récapitule les résultats d'essais mécaniques effectués sur des éprouvettes à deux temps de cure: 90j pour le traitement mixte et 180j pour le traitement à la chaux. Le choix du temps de cure repose sur la différence de cinétique des phases selon la nature du liant (chaux ou ciment). Quel que soit le type de malaxage, la résistance en compression simple de l'argile traitée à 5% de CaO est plus forte comparée à l'argile traitée Mixte. Cinq causes possibles peuvent concourir : type de liant hydraulique, concentration, distribution du liant, densité initiale du mélange compacté, durée de cure. Dans le cas de l'argile d'Héricourt, la concentration en CaO semble favoriser l'augmentation de la résistance à la compression de l'éprouvette. Par contre, l'évolution du module d'élasticité semble peu dépendante de la teneur en chaux.

Tableau 6 . Caractéristiques mécaniques de l'argile traitée à 5%CaO et Mixte

Mélange	Cure(j)	Rc (MPa)		E(MPa)		γ_d (kN/m ³)	
		Long	Court	Long	Court	Long	Court
Mixte	90	2,35	1,52	1110	530	13,62	13,25
5%CaO	180	2,40	2,80	970	1100	12,23	13,16

Le tableau 6 montre également, l'influence du type de malaxage sur les propriétés mécaniques des sols traités. Le malaxage Long entraîne une légère diminution du poids volumique sec de l'argile traitée à 5% de CaO (de $13,16 \text{ kN/m}^3$ à $12,23 \text{ kN/m}^3$). La chaux seule (5%) entraîne le développement des micropores contenus dans l'argile pendant le traitement, comme l'ont montré Cuisinier et al., (2008). Le développement de ces micropores, favorisé par la durée du malaxage, peut expliquer la diminution du module d'Young de 1100 MPa à 970 MPa, respectivement pour un malaxage Court et un malaxage Long. Dans le cas du traitement mixte, l'effet de la chaux qui précède l'ajout de ciment entraîne également l'aération du mélange et la formation des agrégats par

floculation. L'ajout de ciment contribue par la suite à cimenter les agrégats entre eux par le biais de sa capacité d'hydratation et de dispersion. Les résultats d'essais montrent donc que l'effet de cimentation, observable avec le traitement mixte, peut être accentué avec la durée du malaxage. Le module d'Young augmente cette fois ci avec la durée du malaxage (1110 MPa pour le malaxage Long et 530 MPa pour le malaxage Court).

3.4. Effet du malaxage sur l'évolution de la microstructure du sol traité

La partie précédente amène la question sur la distribution des liants dans le sol suivant le type de malaxage. L'observation en micro fluorescence X doit permettre d'identifier et de visualiser la distribution du calcium avec le malaxage.

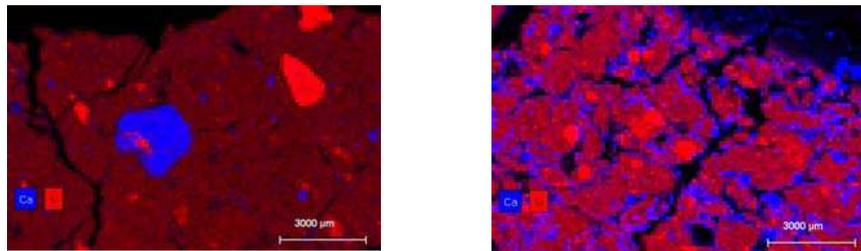


Figure 2. Mouture d'argile traitée à 5% CaO observée au Microfluorescence X – (gauche) Malaxage Long (Ca : 4,11%) – (droite) Malaxage Court (Ca : 6,20%)

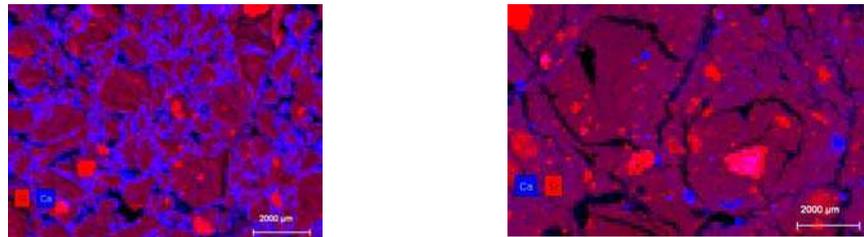


Figure 3. Mouture d'argile traitée 2%CaO 3%CEM (Mixte) observée en microfluorescence X (gauche) Malaxage Long (Ca 0,54%) – (droite) Malaxage Court (Ca 0,27%)

La figure 2 présente la répartition du calcium (en bleu) et du silicium (en rouge) dans la matrice granulaire de l'argile d'Héricourt traitée à 5% de CaO, pour un malaxage Long (fig.2 gauche), et pour un malaxage Court (fig.2 droite). La chaux dispose naturellement d'une forte capacité d'agglomération qui s'accompagne d'une variation hydrique. Avec le malaxage Court, le calcium se repartit sur les bords des mottes ou agrégats. Pour le malaxage Long, les points de concentration de calcium semblent être de plus petite taille et sont observés aussi bien à l'extérieur et à l'intérieur des agrégats (fig.2 gauche). L'aération du mélange par l'effet du traitement à la chaux explique, probablement, la diminution de la résistance mécanique constatée sur le malaxage Long. Elle s'accompagne d'une diminution du module d'élasticité accentuée par la durée de malaxage. Dans le cas du traitement mixte, la figure 3 montre un comportement différent de celui observé avec le traitement à la chaux et les deux types de malaxage. Une meilleure distribution du calcium est observée avec le malaxage Long (fig.3 gauche),

comparée à celle obtenue avec le malaxage Court (fig.3 droite). Le calcium remplit les espaces inter-agrégats et intra-agrégats. La chaux se comporte de la même manière que précédemment et le ciment va solidifier les agrégats et de créer des liaisons inter agrégat. Si la chaux est connue pour sa capacité flocculant indépendamment du malaxage, le ciment dispose d'une forte capacité dispersante, propriété augmentée avec la durée du malaxage.

4. Conclusions

Les paramètres granulométriques C_u et C_c sont également très utiles pour qualifier la mouture d'un matériau traité mais insuffisante pour étudier l'influence de la durée du malaxage sur la granulométrie de la mouture. Le paramètre R basé sur les pentes de la courbe granulométrique de la mouture présente une bonne corrélation avec l'évolution des poids volumiques selon la durée de malaxage. La sensibilité du traitement vis-à-vis de la durée de malaxage a ensuite été étudiée avec l'introduction du paramètre $M(R)$. L'étude de ce paramètre a démontré que le traitement à la chaux seul est peu sensible au malaxage, à l'inverse du traitement mixte. Ces phénomènes sont liés à la distribution des liants dans la matrice granulaire de l'argile. La capacité flocculante de la chaux et la durée de malaxage entraînent l'aération de la microstructure du mélange. Ce comportement explique, probablement, la diminution de la résistance mécanique et du module d'élasticité avec le malaxage Long. Le ciment dispose d'une forte capacité dispersante, par rapport à la chaux, une propriété augmentée avec la durée de malaxage. L'apport du ciment sur le traitement mixte permettrait ainsi de solidifier les agrégats et de créer des liaisons entre les agrégats contigus en formant un squelette rigide. Ce mécanisme expliquerait le gain en résistance mécanique avec le traitement mixte. L'étude des interactions liant-liant et sol-liant, permettra certainement de dégager des éléments supplémentaires pour comprendre l'importance de la mouture sur le comportement hydromécanique des matériaux traités.

Références bibliographiques

- Le Runigo, B., Cuisinier, O; Cui, Y-J , Ferber, V., Denelle, D. (2009) "Impact of initial state on the fabric and permeability of a lime –treated silt under long term leaching ". Canadian Geotechnical Journal, 46, 1243-1257
- Bin. S.; Zhibin, L.; Yi, C.; Xiaoping, Z. (2007) "Micropore structure of aggregates in treated soils." Journal of materials in civil engineering, 99-104; doi: 10.1061/(ASCE) 0899-1561(2007)19:1(99)
- Cuisinier, O., Masrouri, F., Pelletier, M., Villireas, F., Mosser-Ruck, R. (2008). « Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline plume. Applied Clay Science, 40(1-4): 159-170. doi:10.1016/j.clay.2007.07.005.
- Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J., Magnan, J.P. (2008) "Wetting induced volume changes in compacted silty clays and high plasticity clays". Canadian Geotechnical Journal, 45(2): 252-265. Doi: 10.1139/t96-030
- Moussai, B. (1993), "Influence of clod size and method of compaction on the permeability of soils." Bulletin of the international Association of Engineering Geology, Paris, 48, 83-88.