



HAL
open science

Comportement dynamique et cyclique des limons traités à la chaux et au liant hydraulique : approche expérimentale et modélisations

Lucile Pigeot, Nathalie Dufour, Anthony Soive, Fabienne Dermenonville,
Ahmed Loukili

► To cite this version:

Lucile Pigeot, Nathalie Dufour, Anthony Soive, Fabienne Dermenonville, Ahmed Loukili. Comportement dynamique et cyclique des limons traités à la chaux et au liant hydraulique : approche expérimentale et modélisations. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719805

HAL Id: hal-03719805

<https://hal.science/hal-03719805>

Submitted on 11 Jul 2022

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.

Comportement dynamique et cyclique des limons traités à la chaux et au liant hydraulique : approche expérimentale et modélisations

Presentation of the PhD intentions: "Dynamic and cyclic behaviour of silt treated with lime and hydraulic binder"

Lucile PIGEOT^{1,2}, Nathalie DUFOUR¹, Anthony SOIVE¹, Fabienne DERMENONVILLE³, Ahmed LOUKILI²

¹ Cerema, UMR 7329 GEOAZUR, Aix-en-Provence, France

² Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France

³ Egis Structures et environnement, 38180, Seyssins, France

RÉSUMÉ – L'article présente la méthodologie sur laquelle s'appuie une partie des travaux de thèse. La réalisation de l'ensemble du processus permettra de comprendre les évolutions des propriétés mécaniques d'un sol fin compacté et traité à la chaux et au liant hydraulique en fonction du temps de cure. Le travail tentera de passer de l'échelle des hydrates au comportement mécanique identifié par des essais au triaxial monotone.

ABSTRACT – The article presents the methodology on which is based the first part of the thesis. The realization of the whole process will contribute to understand the evolution of the mechanical properties of a fine compacted soil treated with lime and hydraulic binder in function of the curing time. The work will attempt to shift from the hydrate scale to the mechanical behavior identified by monotonic triaxial test.

1. Introduction : Présentation des intentions de thèse et contexte

Le traitement des sols est une technique largement utilisée en terrassement et plus généralement pour la construction d'ouvrages géotechniques dans une optique aussi bien économique qu'environnementale. En effet, cette ingénierie verte est basée sur une utilisation des sols en place et une diminution de l'utilisation de ressources non renouvelables issues de carrière et des émissions de CO₂ liées à leur transport. Dans le cadre des travaux de thèse présentés ici, un sol naturel fin traité à la chaux et au liant hydraulique puis compacté en laboratoire sera étudié.

Dans la littérature, l'évolution (et l'amélioration) des propriétés mécaniques de résistance en fonction des conditions de cure des sols traités s'appuie principalement sur des essais de compression simple sans confinement (UCS) qui permettent de mesurer la résistance à la compression simple (Rc) des sols traités non saturés (Ardah, Chen, et Abu-Farsakh 2017; Das 2021; Kogbara 2014; Mehenni 2015; Okyay et Dias 2010; Soltani et al. 2020). L'évolution de la cohésion et de l'angle de frottement après traitement est plus rarement suivie par le biais d'essais triaxiaux (Basma 1991; Shen et al. 2021), d'essais de cisaillement simple (Rosone, Ferrari, et Celauro 2018) ou d'essais de chargement *in situ* (Cuira 2013). Le couplage hydromécanique est quant à lui abordé par le biais d'essais de perméabilité (Cuira 2013; Cuisinier et al. 2011; Hibouche 2013; Le Runigo et al. 2009; Lemaire 2012; Wild, Arabi, et Rowlands 1987), d'analyses sur l'érosion interne et externe (Mehenni 2015) et le lessivage (Vitale, Deneele, et Russo 2020a) ou d'essais prenant en compte des cycles d'humidification-séchage (Das 2021; Tang, Vu, et Cui 2011; Wang et al. 2012).

A l'échelle des particules minérales de sol et de traitement, les matériaux traités sont étudiés grâce à l'imagerie au microscope électronique à balayage (MEB). Ces analyses

permettent de suivre l'évolution microstructurale liée au traitement et notamment le développement de liaisons et de coques d'hydrates autour et entre les grains de sol. A partir de ces observations, (Cabane 2004) propose une suite de schémas représentant le passage d'un sol homogène non traité à un ensemble d'agrégats entourés d'une coque d'hydrates qui se développe pendant la cure.

La bibliographie met ainsi en évidence d'une part une évolution des propriétés mécaniques à l'échelle de l'éprouvette ou de l'ouvrage et d'autre part des changements micromorphologiques du sol après traitement. Afin d'expliquer le lien entre ces deux échelles une compréhension plus fine des réactions liées à l'hydratation du matériau jusqu'à leur impact sur la résistance du sol est attendu. Des études sur l'hydratation des ciments et mortiers identifient par exemple les Silicates tricalciques (C_3S) comme étant ceux qui participent le plus à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques en fonction de la cure (Benghazi s. d.; Jacquemot 2014).

Pour mener à bien ce travail, la caractérisation physico-chimique expérimentale de chacun des constituants du sol traité (sol naturel, chaux et liant hydraulique) est incontournable. Avec cette information, un modèle d'hydratation pourra être construit et permettra d'estimer la quantité d'hydrates formés dans le sol traité en fonction du temps de cure. Ces développements originaux (peu de modèles de comportement des sols traités prenant en compte la cinétique d'hydratation) se baseront sur des travaux dans le domaine des bétons où les analyses se mènent d'avantage à l'échelle de l'hydrate (Bary et al. 2013; Jacquemot 2014; Trauchessec 2013). Cette étape sera validée à plusieurs échéances de temps prédéfinies par des analyses expérimentales sur le sol traité. Dans un second temps, numériquement, il sera possible de calculer les propriétés mécaniques homogénéisées du matériau traité. Ces résultats seront comparés à ceux issus d'essais de mécanique des sols menés sur des éprouvettes de sol traité fabriquées en laboratoire. Enfin, les éprouvettes seront soumises à des sollicitations triaxiales monotones. Cette étape sera réalisée numériquement et expérimentalement pour observer et comprendre leur mécanisme de rupture.

Les paramètres tels que la nature et le dosage du traitement ou la densité du sol compacté ne seront pas variables dans ces travaux de thèse.

2. Les effets du traitement à la chaux et au liant hydraulique à l'échelle de l'hydrate

Compte tenu de la nature et de l'utilisation des sols, un traitement à la chaux et au liant hydraulique a été déterminé. Composé de clincker de ciment Portland et de laitiers de hauts fourneaux, l'hydratation du liant est estimée analogue à celle des bétons car le sol, un limon peu argileux est supposé inerte.

2.1. Les réactions chimiques

La chaux utilisée est composée de chaux vive CaO et d'un ensemble d'autres éléments (SiO_2 , MgO , K_2O , Al_2O_3 ..) (Boumehraz et al. 2020), elle peut également être déjà légèrement hydratée et comporter de la chaux éteinte (Portlandite). Dans le liant hydraulique utilisé, une quantité de CaO est également présente. A court terme, l'ajout de traitement entraîne l'hydratation de la chaux vive en Portlandite ($Ca(OH)_2$) avec l'eau libre du sol selon la réaction suivante :

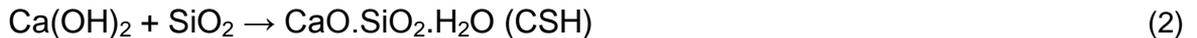


Cette réaction exothermique peut se traduire par une modification de la distribution granulométrique du matériau (Osula, 1996) et de la distribution des pores (Lemaire et al. 2013). La libération de cations de calcium Ca^{2+} et d'hydroxydes anions HO^- dans le sol, augmente le pH du milieu poreux pour atteindre le seuil de 12,4.

Ensuite les réactions pouzzolaniques vont entraîner la consommation de la Portlandite qui s'associe à des minéraux présents dans le sol (silice et alumine) pour former des

hydrates. Ils sont définis comme des produits cimentaires secondaires ayant des propriétés liantes (Benezet 1999; Eid et al. 2015) :

- les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) (2)
- les hydrates d'aluminat de calcium (C-A-H) (3)
- les hydrates d'aluminosilicate de calcium (C-A-S-H)



Lors des réactions pouzzolaniques, la liaison des ions OH - provoque une réduction du pH, qui peut conduire à une décalcification progressive des hydrates de type CSH et/ou CAH nouvellement formés (Saussaye 2012).

La présence de minéraux argileux ou de perturbateurs tel que des composés sulfatés ou azotés peut modifier la formation des hydrates en intervenant dans les réactions pouzzolaniques (Cabane 2004).

2.2. Des outils numériques pour l'hydratation

Des logiciels tels que GEM-Selektor (Kulik et al. 2012) ou PHREEQC (Parkhurst et Appelo 2013) sont des outils efficaces permettant de résoudre des équations à l'équilibre en se basant sur les données thermodynamiques des éléments réactifs (Jacquemot 2014; Trauchessec 2013). Des bases de données supplémentaires comme CEMDATA18 (développé par EMPA) (Lothenbach et al. 2018) ou Thermodem (développé par le BRGM) (Blanc et al. 2010) peuvent être couplées aux logiciels. CEMDATA18 par exemple, est spécifiques aux ciments et regroupe notamment les hydrates composants les ciments Portland. Pour que la cinétique entre en jeu dans les modèles, une notion de temps doit être prise en compte dans les réactions.

En données d'entrées, les quantités et compositions respectives des liant, chaux et limon naturel (massiques, molaires) sont attendues. Une validation de la nature et des quantités d'hydrates formés en fonction du temps obtenus dans le modèle est confrontée à des analyses chimiques et minérales du sol traité à plusieurs échéances de temps (Trauchessec 2013).

2.3. Caractérisation chimique à l'échelle microscopique : données d'entrée et validations du modèle

Un couplage des essais DRX et ATG est nécessaire pour obtenir les compositions minérale et chimique de la chaux, du liant hydraulique et du sol fin utilisés. De la composition chimique du sol il est possible d'obtenir l'équivalent en composition minérale, par le biais des formules de Bogue (Bogue 1955).

Une analyse initiale va permettre de déterminer les compositions de chacun des composants séparément, puis une analyse du mélange avant cure puis après différents temps de cure permettra d'estimer l'évolution de l'hydratation par le biais de la formation d'hydrates dans le sol (Al-Mukhtar, Lasledj, et Alcover 2010).

Utilisée dans le cadre des sols traités par (Deneele et al. 2016), (Cabane 2004), (Lemaire 2012) (Vitale, Deneele, et Russo 2020b) (Falah et al. 2018), la DRX ou diffraction des rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique utilisée sur les matériaux sous forme de poudre. Elle permet une identification qualitative des matériaux cristallisés actifs et inertes, qui ne réagissent pas comme le quartz, la périclase, qui pourraient être présents dans le limon naturel et doivent être écartés lors de l'analyse. Il peut être couplée à un essai d'identification quantitatif comme l'ATG ou analyse thermogravimétrique. Cet essai consiste à mesurer la masse d'un échantillon en fonction du temps lorsque celui-ci est soumis à des variations de température pour en déduire ses différentes phases.

La validation des modèles d'hydratation à chaque échéance de temps étudiée est une étape clé avant d'estimer les propriétés mécaniques homogénéisées du sol traité.

3. L'homogénéisation numérique

3.1. Le principe

Le principe d'homogénéisation multi-échelle tend à estimer les propriétés homogénéisées d'un matériau hétérogène constitué d'inclusions en intégrant des informations sur la fraction volumique et les propriétés de chacun des constituants du matériau pris individuellement.

Des modèles d'homogénéisation multi-échelle sont utilisés pour estimer les propriétés élastiques et diffusives de matériaux cimentaires en se basant sur des principes de couches concentriques représentant les grains entourés de coques d'hydrates (Bary et al. 2013 ; Stora et al. 2009). Chaque niveau microstructural correspond à un volume élémentaire représentatif (VER) qui doit être au moins trois fois plus grand que la taille de la plus grande hétérogénéité. Dans le cas des pâtes cimentaires, trois niveaux sont étudiés, avec pour chacun une proportion de pores correspondant à la distribution porale de la pâte dans sa totalité.

A ces échelles, des modèles ont été proposés pour comprendre les interactions au sein de feuillets d'argiles, dans des argilites notamment (Cariou 2010).

Dans le domaine des sols traités, quelques modèles ont été proposés à l'échelle du grain de sol, avec des coulis cimentaires englobant des squelettes périodiques représentant le sol (Vu 2008). Il existe aussi des modélisations du comportement mécanique d'éprouvettes d'argile traitée à la mousse, les bulles de mousses étant modélisées comme des inclusions sphériques réparties périodiquement dans une matrice argileuse (Selmi 2020). Ces modélisations s'appuient notamment sur le modèle de (Hashin et Shtrikman 1963) qui permet d'encadrer les valeurs des modules d'élasticité.

Les données d'entrée de l'homogénéisation du limon traité seront les résultats de la modélisation de l'avancement de l'hydratation croisées à des essais d'identification et de caractérisation en laboratoire spécifiques à chaque échelle.

3.3. Essais de laboratoire : données d'entrée et validation du modèle

3.3.1. Courbe granulométrique par diffraction laser

A l'échelle d'une éprouvette de laboratoire, le résultat de la granulométrie par diffraction laser est utilisé pour distinguer la proportion de sable, limon et argile du sol naturel en se basant sur le diamètre des particules. La granulométrie du sol est ensuite modifiée par le traitement.

3.3.2. Compositions minérales

Le cortège minéral du sol naturel, de la chaux et du liant déterminé à partir des essais de DRX et ATG sert également de donnée d'entrée.

3.3.3. Microstructure

L'estimation des modifications microstructurales induites par le traitement peuvent être suivies par imagerie au MEB (Microscope électronique à Balayage). (Cabane 2004) met en évidence la relation entre les conditions de cure et le développement des minéraux pendant l'hydratation. Par exemple, une cure immergée serait d'avantage susceptible d'entraîner un développement des minéraux sous forme d'aiguilles.

3.3.4. Distribution porale

La porosité est une caractéristique intrinsèque importante pour expliquer le comportement hydromécanique du sol et plus particulièrement les interactions fluide-solide qui interviennent sous l'effet de sollicitations externes, par le biais de la pression interstitielle (Le Runigo et al. 2009; Lemaire et al. 2013; Wang et al. 2016; Wild et al. 1987; Ying et al. 2020). Connaître l'espace poreux et les connexions entre les pores permet d'analyser le comportement des sols (Kherbouche 1994). L'estimation de la distribution porale des éprouvettes de limon naturel et de limon traités compactés mettent en évidence les deux types de pores qui se distinguent dans les sols : les macropores situés entre les agglomérats de sol et les micro-pores, à l'intérieur de ces agglomérats (Lemaire 2012).

Des essais de porosimétrie par intrusion de mercure sont utilisés pour étudier l'impact de la chaux et du liant sur la répartition et la taille des pores dans le sol en fonction du traitement. Pendant l'hydratation, la coque d'hydrate se développe sur la surface des grains et ils entrent en contact les uns avec les autres, modifiant la micromorphologie du sol et pouvant obstruer des pores.

Ces données sont utilisées pour estimer la proportion de pores à chaque échelle du modèle d'homogénéisation.

3.3.5. Perméabilité

La perméabilité, intrinsèquement liée à la microstructure, peut être obtenue par des essais de perméabilité réalisés sur des éprouvettes triaxiales de sol en appliquant un gradient hydraulique entre le haut et le bas de l'éprouvette. Liée à la loi de Darcy qui définit les écoulements fluides en milieu poreux, la perméabilité (k) est l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Des liens entre cette donnée sur le sol naturel et de sol traité à différents temps de cure et le remplissage des pores à chaque échelle sont utiles pour identifier les états de saturation de chaque niveau structurel.

3.3. Validation des résultats de l'homogénéisation

Les calculs d'homogénéisation sont réalisés dans des milieux théoriques sans contraintes. Les modules d'élasticité (module d'Young et module de cisaillement) obtenus par les méthodes numériques seront confrontés à des mesures expérimentales réalisées sur des éprouvettes de sols traités fabriquées en laboratoire et non confinées. La mesure de la célérité des ondes S et P dans l'éprouvette à l'aide de capteurs piézoélectriques (Bender Element), permettra d'estimer les modules et coefficient de Poisson du matériau. Ces résultats seront des moyens de valider l'homogénéisation du sol naturel et du sol traité à plusieurs temps de cure. Ce type d'essai peut être aussi bien réalisé sur des sols naturels compactés que traités, saturés ou non (Tang et al. 2011).

4. A l'échelle de l'éprouvette

La dernière étape de ce processus de compréhension de l'évolution des propriétés mécaniques en partant de l'hydratation du sol traité est de soumettre des éprouvettes de sol à des chargements monotones et d'en observer les déformations résultantes. Les hypothèses régissant le principe de la poroélasticité en milieu poreux isotrope permettent l'utilisation des propriétés mécaniques du VER homogénéisé pour l'éprouvette (Kherbouche 1994).

4.1. Modélisation numérique d'essais triaxiaux monotones

Les essais triaxiaux sont réalisés numériquement en modélisant une éprouvette de sol dont les propriétés mécaniques initiales ont été déterminées précédemment. Les résultats permettront d'étudier l'évolution des paramètres de déformabilité et de résistance

(cohésion et angle de frottement) (Selmi 2020). La modélisation sera réalisée dans le cadre de la poromécanique, assurant ainsi un couplage entre la déformation de la partie solide et les écoulements de fluides. La prise en compte des conditions drainée ou non drainée aura un impact sur le remplissage des pores du matériau et passera par une exploitation de la perméabilité.

Le but est de pouvoir représenter l'évolution des propriétés à n'importe quel instant du traitement.

4.2. Essais triaxiaux monotones en laboratoire

Les résultats de la modélisation décrite précédemment seront confrontés aux résultats d'essais triaxiaux réalisés en laboratoire (AFNOR 2018) sur des éprouvettes de sols non traité et traités. Les conditions de cure, de drainage et les pressions de confinement seront variées.

5. Conclusions

Dans ces travaux de thèse, la modélisation est utilisée comme un outil de compréhension des mécanismes observés expérimentalement et non comme une représentation des essais. Des échanges entre les résultats expérimentaux et numériques seront nécessaires pour comprendre chaque étape développée précédemment : hydratation, homogénéisation, caractérisation du comportement mécanique sous sollicitation à l'échelle de l'éprouvette. Une fois que l'ensemble de ce processus sera validé, la partie des travaux de thèse sur le comportement dynamique et cyclique de ces sols traités pourra être abordée, par l'intermédiaire d'essais de résonance en torsion (ASTM D4015 - 21 2021).

6. Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans cet article sont financés par EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT et l'Ecole Centrale de Nantes. L'encadrement est assuré par le Cerema et l'Ecole Centrale de Nantes. Nous remercions également la société du Canal Seine Nord Europe.

7. Références bibliographiques

- AFNOR. 2018. *Norme NBN EN ISO 17892-9:2018*.
- Al-Mukhtar, Muzahim, Abdelmadjid Lasledj, et Jean-Francois Alcover. 2010. « Behaviour and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50°C ». *Applied Clay Science* 50(2):199- 203. doi: 10.1016/j.clay.2010.07.022.
- Ardah, Allam, Qiming Chen, et Murad Abu-Farsakh. 2017. « Evaluating the Performance of Very Weak Subgrade Soils Treated/Stabilized with Cementitious Materials for Sustainable Pavements ». *Transportation Geotechnics* 11:107- 19. doi: 10.1016/j.trgeo.2017.05.002.
- ASTM D4015 - 21. 2021. *Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. ASTM International. doi: 10.1520/D4015-21.
- Bary, Benoît, Nikos Letierrier, Estelle Deville, et Patrick Le Bescop. 2013. « Coupled Mechanical and Chemo-Transport Model for the Simulation of Cementitious Materials Subjected to External Sulfate Attack ». P. 85- 92 in.
- Basma, Adnan A. 1991. « Strength and Stress-Strain Characteristics of a Lime-Treated Cohesive Soil ». *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD* 10.
- Benezet, Jean-Charles. 1999. « Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz ». *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES* (219):12.
- Benghazi, Zied. s. d. « Cours : Technologie des Géomatériaux ; Chapitre : Le ciment ».

- Blanc, Ph., X. Bourbon, A. Lassin, et E. C. Gaucher. 2010. « Chemical model for cement-based materials: Thermodynamic data assessment for phases other than C–S–H ». *Cement and Concrete Research* 40(9):1360- 74. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.04.003.
- Bogue, Robert Herman. 1955. *The Chemistry of Portland Cement*. New York: Reinhold Pub. Corp.
- Boumehrad, Mohammed-Amin, Mekki Mellas, Farida Boucetta, Nour El, Houda Meghaichi, et Meriem Chebah. 2020. « Comportement mécanique du schiste traité par des ajouts du ciment et de la chaux ». 11.
- Cabane, Nicolas. 2004. « 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, Université Jean Monnet - Saint-Etienne.
- Cariou, Sophie. 2010. « Couplage hydro-mécanique et transfert dans l'argilite de Meuse/Haute-Marne: approches expérimentale et multi-échelle ». 347.
- Cuira, F. 2013. « Modélisation numérique du comportement d'une colonne de soil-mixing et confrontation à un essai de chargement en vraie grandeur ». 4.
- Cuisinier, Olivier, Jean-Claude Auriol, Tangi Le Borgne, et Dimitri Deneele. 2011. « Microstructure and Hydraulic Conductivity of a Compacted Lime-Treated Soil ». *Engineering Geology* 123(3):187- 93. doi: 10.1016/j.enggeo.2011.07.010.
- Das, Geetanjali. 2021. « Evaluation of kneading compaction method and the long-term performances of lime-treated soils. » Thèse de doctorat, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES.
- Deneele, Dimitri, Barbara Le Runigo, Yu-Jun Cui, Olivier Cuisinier, et Valéry Ferber. 2016. « Experimental Assessment Regarding Leaching of Lime-Treated Silt ». *Construction and Building Materials* 112:1032- 40. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.015.
- Eid, Joanna, Said Taibi, A. Lefebvre, et J. E. Dandjinou. 2015. « Le traitement des Sols à la chaux et aux liants hydrauliques - Aspects Physico-Chimiques ». 8.
- Falah, Mahroo, Kaveh Ranjbar Pouya, Ali Tolooiyan, et Kenneth Mackenzie. 2018. « Structural Behaviour of an Australian Silty Clay (Coode Island Silt) Stabilised by Treatment with Slag Lime ». *Applied Clay Science* 157:198- 203. doi: 10.1016/j.clay.2018.02.045.
- Hashin, Z., et S. Shtrikman. 1963. « A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behaviour of Multiphase Materials ». *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 11(2):127- 40. doi: 10.1016/0022-5096(63)90060-7.
- Hibouche, Akli. 2013. « Sol traités aux liants: performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques : application en BTP ». Thèse de doctorat, Le Havre.
- Jacquemot, François. 2014. « Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton ». Thèse de doctorat, Lille 1.
- Kherbouche, Rochane. 1994. « Etude expérimentale du comportement poroélastoplastique de la craie ». Thèse de doctorat, Lille 1.
- Kogbara, Reginald B. 2014. « A review of the mechanical and leaching performance of stabilized/solidified contaminated soils ». *Materials Science*. doi: 10.1139/ER-2013-0004.
- Kulik, Dmitrii A., Thomas Wagner, Svitlana V. Dmytrieva, Georg Kosakowski, Ferdinand F. Hingerl, Konstantin V. Chudnenko, et Urs R. Berner. 2012. « GEM-Selektor Geochemical Modeling Package: Revised Algorithm and GEMS3K Numerical Kernel for Coupled Simulation Codes ». *Computational Geosciences*. doi: 10.1007/s10596-012-9310-6.
- Le Runigo, Barbara, Olivier Cuisinier, Y. J. Cui, V. Ferber, et Dimitri Deneele. 2009. « Impact of initial state on the fabric and permeability of a lime-treated silt under long-term leaching ». *Canadian Geotechnical Journal* 46:1243- 57. doi: 10.1139/T09-061.
- Lemaire, Kevin. 2012. « Evolution des caractéristiques physico-chimiques, microstructurales et hydromécaniques de limon traités aux liants lors d'une circulation d'eau ». Thèse de doctorat.
- Lemaire, Kévin, Dimitri Deneele, Stéphanie Bonnet, et Michel Legret. 2013. « Effects of Lime and Cement Treatment on the Physicochemical, Microstructural and Mechanical Characteristics of a Plastic Silt ». *Engineering Geology* 166:255- 61. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.09.012.
- Lothenbach, Barbara, Dmitrii Kulik, Thomas Matschei, Magdalena Balonis, Luis Baquerizo, Belay Dilnesa, George Miron, et Rupert Myers. 2018. « Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials ». *Cement and Concrete Research* 115. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.018.

- Mehenni, Abdelwadoud. 2015. « Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités ». Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Okay, U. S., et D. Dias. 2010. « Use of Lime and Cement Treated Soils as Pile Supported Load Transfer Platform ». *Engineering Geology* 114(1):34- 44. doi: 10.1016/j.enggeo.2010.03.008.
- Parkhurst, David L., et C. A. J. Appelo. 2013. *Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3: A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Report. 6-A43*. Reston, VA. doi: 10.3133/tm6A43.
- Rosone, Marco, Alessio Ferrari, et Clara Celauro. 2018. « On the Hydro-Mechanical Behaviour of a Lime-Treated Embankment during Wetting and Drying Cycles ». *Geomechanics for Energy and the Environment* 14:48- 60. doi: 10.1016/j.gete.2017.11.001.
- Saussaye, Lucile. 2012. « Traitement des sols aux liants hydrauliques: aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification ». Thèse de doctorat, Université de Caen.
- Selmi, Moez. 2020. « Etude expérimentale et modélisation du comportement des sols meubles traités par un agent tensio-actif ». Thèse de doctorat, Université de Lyon.
- Shen, Yuan-shun, Yong Tang, Jie Yin, Mei-ping Li, et Ting Wen. 2021. « An Experimental Investigation on Strength Characteristics of Fiber-Reinforced Clayey Soil Treated with Lime or Cement ». *Construction and Building Materials* 294:123537. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123537.
- Soltani, Amin, An Deng, Abbas Taheri, Mehdi Mirzababaei, et Mark B. Jaksa. 2020. « A Dimensional Description of the Unconfined Compressive Strength of Artificially Cemented Fine-Grained Soils ». *Journal of Adhesion Science and Technology* 34(15):1679- 1703. doi: 10.1080/01694243.2020.1717804.
- Stora, Eric, Benoît Bary, Q. C. He, Estelle Deville, et P. Montarnal. 2009. « Modelling and simulations of the chemo-mechanical behaviour of leached cement-based materials. Leaching process and induced loss of stiffness ». *Cement and Concrete Research* 39:763- 72. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.05.010.
- Tang, A. M., M. N. Vu, et Y. J. Cui. 2011. « Effects of the Maximum Soil Aggregates Size and Cyclic Wetting–Drying on the Stiffness of a Lime-Treated Clayey Soil ». *Géotechnique* 61(5):421- 29. doi: 10.1680/geot.SIP11.005.
- Trauchessec, Romain. 2013. « Mélanges de ciments sulfoalumineux et Portland ». Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Vitale, Enza, Dimitri Deneele, et Giacomo Russo. 2020a. « Microstructural Investigations on Plasticity of Lime-Treated Soils ». *Minerals* 10:386. doi: 10.3390/min10050386.
- Vitale, Enza, Dimitri Deneele, et Giacomo Russo. 2020b. « Microstructural Investigations on Plasticity of Lime-Treated Soils ». *Minerals* 10(5):386. doi: 10.3390/min10050386.
- Vu, Quoc Huy. 2008. « Modélisation micromécanique du comportement d'un sol injecté ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Wang, Min, Lingwei Kong, Chong Zhao, et Meng Zang. 2012. « Dynamic Characteristics of Lime-Treated Expansive Soil under Cyclic Loading ». *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 4(4):352- 59. doi: 10.3724/SP.J.1235.2012.00352.
- Wang, Yejiao, Yu-Jun Cui, Anh Minh A. M. Tang, Chaosheng Tang, et Nadia Benahmed. 2016. « Changes in thermal conductivity, suction and microstructure of a compacted lime-treated silty soil during curing ». *Engineering Geology* 202:114- 21. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.01.008.
- Wild, S., Mehdi Arabi, et G. O. Rowlands. 1987. « Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay–lime systems ». *Materials Science and Technology* 3:1005- 11. doi: 10.1179/026708387790329432.
- Ying, Zi, Yu-jun Cui, Nadia Benahmed, et Myriam Duc. 2020. « Changes in Mineralogy and Microstructure of a Lime-Treated Silty Soil during Curing Time ». *E3S Web of Conferences* 195:03044. doi: 10.1051/e3sconf/202019503044.