



HAL
open science

Proposition d'un modèle d'homogénéisation des propriétés mécaniques d'un limon traité à la chaux et au liant hydraulique

Lucile Pigeot, Anthony Soive, Nathalie Dufour, Jean-François Barthélémy,
Fabienne Dermenonville, Ahmed Loukili

► To cite this version:

Lucile Pigeot, Anthony Soive, Nathalie Dufour, Jean-François Barthélémy, Fabienne Dermenonville, et al.. Proposition d'un modèle d'homogénéisation des propriétés mécaniques d'un limon traité à la chaux et au liant hydraulique. Academic Journal of Civil Engineering, 2023, 41 (1), 10.26168/10.26168/ajce.41.1.21 . hal-04360313

HAL Id: hal-04360313

<https://hal.science/hal-04360313v1>

Submitted on 13 Jan 2025

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Proposition d'un modèle d'homogénéisation des propriétés mécaniques d'un limon traité à la chaux et au liant hydraulique

Lucile Pigeot¹, Anthony Soive², Nathalie Dufour², Jean-François Barthélémy³, Fabienne Dermenonville⁴, Ahmed Loukili⁵

¹Doctorante, GeM, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France

²Dr., Equipe de recherche GeoCoD, Cerema, Aix-en-Provence, France

³Dr., Cerema, UMR MCD, Cerema, Provins Cedex, France

⁴Egis Structures et environnement, Seyssins, France

⁵Professeur des Universités, GeM, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France

RESUME

Les impératifs économiques et environnementaux incitent les maîtres d'ouvrage à se tourner vers l'utilisation de sols in situ pour la construction d'ouvrages géotechniques. Généralement, les faibles performances géotechniques de ces sols sont améliorées par traitement et compactage. Le matériau étudié dans l'article est un sol limoneux peu argileux qui a été traité avec 1% de chaux et 5% de liant hydraulique. Cet article se concentre sur la faisabilité d'un modèle numérique pour prédire le comportement mécanique de ce sol traité. Des observations au MEB (microscope électronique à balayage) de limon traité réalisées par des auteurs précédents ont permis de proposer une microstructure du sol qui serait composée d'agrégats de sols naturels entourés de coques d'hydrates. Un modèle numérique d'homogénéisation multi-échelle est présenté pour valider ces hypothèses. Les propriétés mécaniques homogénéisées obtenues numériquement sont comparées à des modules d'Young mesurés en laboratoire sur des éprouvettes de sol traité. Les résultats obtenus numériquement se situent dans l'ordre de grandeur des résultats expérimentaux.

Mots-clefs Sol traité, Homogénéisation multi-échelle, Hydratation de phases cimentaires, Microstructure, Propriétés mécaniques.

I. INTRODUCTION

L'amélioration des sols par traitement et compactage est de plus en plus utilisée dans les grands projets géotechniques. Afin d'optimiser les ouvrages, il est nécessaire de prédire le comportement de ces matériaux. Leurs propriétés mécaniques dépendent du temps cure, moment à partir duquel il y a eu ajout de chaux et de liant hydraulique. Elles peuvent être suivies par des essais mécaniques de laboratoire (par exemple des essais de compression uniaxiale ou des essais triaxiaux). Dans les études sur les matériaux cimentaires (Jacquemot, 2014), la résistance à la compression des mortiers en fonction du temps de cure est généralement associée au degré d'avancement des réactions d'hydratation qui peut être estimé en mesurant l'évolution de la quantité d'hydrates formés (par

diffraction des rayons X (DRX) et/ou analyse thermogravimétrique (ATG)). En revanche, ces mesures expérimentales ne fournissent pas de résultats quantitatifs satisfaisants sur les sols traités. En effet, les dosages en chaux et en ciment (<10%) produisent une quantité limitée d'hydrates qui sont souvent mal cristallisés, ce qui rend difficile leur identification (Bouras, 2020; Maubec, 2010).

Pour comprendre l'origine du gain mécanique apporté par la chaux et les liants hydrauliques, des études ont été menées sur la microstructure des sols avant et après traitement. Des auteurs ont mis en évidence un changement en termes de microstructure dans les sols après leur traitement : la création de liaisons entre les grains de sol favorise leur floculation et les produits de l'hydratation forment des coques autour des agrégats de sol naturel (Cabane, 2004; Lemaire, 2012).

Un modèle d'homogénéisation multi-échelle est présenté pour tester ces hypothèses microstructurales et passer de l'échelle des hydrates au comportement du sol à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire. L'objectif de cette étude est de tester différents schémas structurels et de valider l'estimation de la quantité de phases d'hydrates formées en utilisant des méthodes d'homogénéisation numérique. Les résultats du modèle sont comparés à des mesures de modules d'Young (E) d'éprouvettes de limon traité après des cures de 28 et 90 jours à 20°C.

II. CARACTERISATION DES MATERIAUX

A. Compositions

Le sol traité est un mélange de limon avec 1% de chaux et 5% de liant hydraulique. Selon le système de classification (USCS) le limon est classé ML (limon à faible limite liquide). Après avoir été tamisé à 0,2 mm une analyse granulométrique par diffraction laser a été réalisée. L'identification de la taille des particules indique une composition équivalente à 81,41% de limon, 11,03% d'argile et 7,55% de sable. La taille du tamisat de 0,08 mm est supérieure à 80% et le diamètre maximal des grains D_{max} est égal à 0,135mm (ISO, 2020). La composition minéralogique a été analysée par diffraction des rayons X (DRX) : le limon est principalement composé de quartz, de phases carbonatées (Calcite et Dolomite), de silicates (Muscovite, Microcline et Clinocllore) de feldspaths (Albite) de minéraux argileux (Kaolinite) et d'hématite. Cette composition s'apparente à plusieurs sols limoneux du nord de la France (Lemaire, 2012; Maubec, 2010). A l'échelle de l'éprouvette, le sol naturel est considéré comme une entité homogène en termes de composition minéralogique et de teneur en eau.

Des mesures d'analyse thermogravimétrique (ATG) et de diffraction des rayons X (DRX) ont été utilisées pour caractériser la chaux et le liant hydraulique. La chaux contient principalement de la chaux vive (90% de CaO), elle est peu hydratée (7% de Portlandite) et légèrement carbonatée (0,5% de Calcite). Le liant hydraulique contient environ 65% de laitier et 35% de ciment Portland. De par sa composition, il peut être comparé à un CEM III/A (Stephant, 2015).

B. Résultats expérimentaux

Un essai Proctor standard (ASTM D698-12, 2021) a été réalisé pour déterminer la teneur en eau optimale [%] correspondant à la densité sèche maximale [Mg/m^3] pour un mélange de limon avec 1% de chaux et 5% de liant hydraulique. Amené à la teneur en eau voulue, le mélange est compacté statiquement en une seule couche pour obtenir des éprouvettes de sol de 50 mm de diamètre et de

100 mm de hauteur (Serratrice, 2018). Les éprouvette traitées et non traitées ont les mêmes caractéristiques : une densité de 19,9 KN/m³ (96% de ρ_{OPN} Optimal Proctor Normal), un degré de saturation S_r de 79% et une porosité totale de 36%. Les éprouvettes traitées ont été stockées hermétiquement dans une atmosphère contrôlée à 20°C pendant 28 et 90 jours. Selon le GTS (Guide de Traitement des sols (LCPC/SETRA, 2000)), le sol atteint ses propriétés mécaniques définitives après 90 jours de cure à 20°C, ce qui justifie l'échéance de temps maximale choisie.

Des essais de compression uniaxiale ont été réalisés afin d'obtenir l'évolution des propriétés de déformabilité et de résistance du limon traité (voir Tableau 1). Les modules d'Young (E) et les coefficients de Poisson (ν) correspondent à une déformation axiale de l'ordre de 10^{-3} . La résistance à la compression uniaxiale est notée R_c .

TABLEAU 1. Évolution des propriétés de déformabilité et de résistance du limon naturel et du limon traité après 28 et 90 jours de cure.

	E (MPa)	ν	R_c (MPa)
Sol compacté non traité	3,9	0,4	0,1 - 0,6
Sol compacté traité (après 28 jours)	100	0,38	1,8 - 2
Sol compacté traité (après 90 jours)	220	0,36	2,5 - 3

III. MODÈLE D'HOMOGENÉISATION NUMÉRIQUE

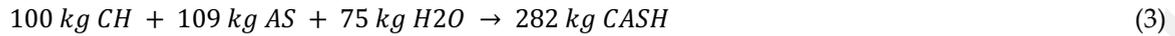
Pour comprendre l'origine du gain mécanique mesuré expérimentalement et pour représenter ce matériau hétérogène, un modèle d'homogénéisation est proposé. Les simulations ont été rendues possibles par une bibliothèque Python développée au Cerema (Barthélémy, 2022). Les données d'entrée nécessaires au modèle sont la nature et la fraction volumique des composants (sol, pores, hydrates), leurs propriétés mécaniques (module d'Young et coefficient de Poisson) et une hypothèse sur la représentation morphologie du sol après traitement, détaillé ci-dessous. Trois échelles différentes ont été utilisées, basées sur les trois familles de taille de pores identifiées par des analyses de distribution porale sur des limons traités similaires : une nano-porosité, une micro-porosité et une macro-porosité (Nguyen, 2015).

A. Hydratation

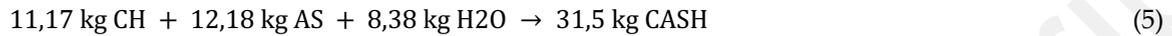
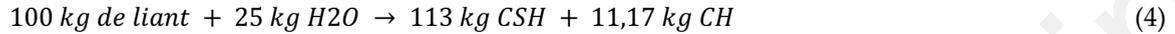
Lorsqu'elles sont ajoutées à un sol humide, les phases anhydres de la chaux et du ciment réagissent avec l'eau présente dans le sol pour former des phases hydratées. Pour être plus précis, la chaux ajoutée réagit avec l'eau disponible dans le sol pour former de la Portlandite (CH en notation ciment) (Eq. 2) et provoque une floculation du sol. Le liant hydraulique s'hydrate également et forme des CSH (silicates de calcium hydratés) et de la Portlandite (CH) (Eq. 4). La Portlandite créée peut alors réagir avec les silicates et aluminates présents dans le sol (A-S) pour former des CASH (aluminosilicates de calcium hydratés) (Eq. 3, 5). Comme expliqué précédemment, l'identification expérimentale des phases hydratées dans les sols traités est difficile. Pour éviter ce problème, il est possible de quantifier analytiquement les phases formées. Les équations proposées par Åhnberg (Åhnberg, 2006) ont été utilisées pour estimer les quantités maximales de CH, CSH et CASH formés par l'ajout de chaux et de liant dans le limon. Toute la Portlandite (CH) créée est censée réagir avec

les aluminates et les silicates (A-S) du sol pour former des aluminosilicates de calcium hydratés (CASH).

Pour la chaux :



Pour le liant (65% de laitier et 35% de ciment Portland) :



Les propriétés mécaniques (module d'Young et coefficient de Poisson) de chacun des constituants du mélange sont ensuite nécessaires. Les modules des éléments hydratés proviennent de résultats de mesures de nanoindentation réalisées sur des pâtes de ciment provenant de la littérature (voir Tableau 2).

TABLEAU 2. Propriétés mécaniques des hydrates formés.

	E (GPa)	ν	Référence
CSH (silicates de calcium hydratés)	16,8 - 41,5	0,24	(Hay et al., 2020)
Portlandite (CH)	42,3	0,324	(Monteiro and Chang, 1995)
Aluminosilicates de calcium hydratés (CASH)	21,7 - 29,4	0,36	(Hay et al., 2020)

B. Microstructure

A partir d'observations au microscope électronique à balayage (MEB) couplées à des cartographies chimiques réalisées sur des sols traités, (Lemaire, 2012) a mis en évidence la présence d'une couche d'hydrates entourant des agrégats de sol naturel (Figure 1 a)). Ces observations permettent de supposer que l'action de la chaux et celle du liant hydraulique doivent être séparées. En effet, la chaux, ajoutée en premier contribuerait à floculation du sol en agrégats et à la présence d'hydrates à l'intérieur des agrégats de sol. Ensuite, l'ajout de liant hydraulique engendrerait la formation d'une pâte cimentaire autour de ces agrégats qui, pendant l'hydratation, se transforme en coques reliées par des ponts cimentaires (Cabane, 2004). De ce fait, les hydrates provenant de la chaux ne participeraient pas à la formation de cette coque cimentaire. (Cabane, 2004) a proposé une représentation schématique de ce limon traité : les agrégats sont de taille millimétrique et un ajout de 5% de liant engendre la formation d'une coque d'hydrates d'une épaisseur d'environ 30 μm (Figure 1 b).

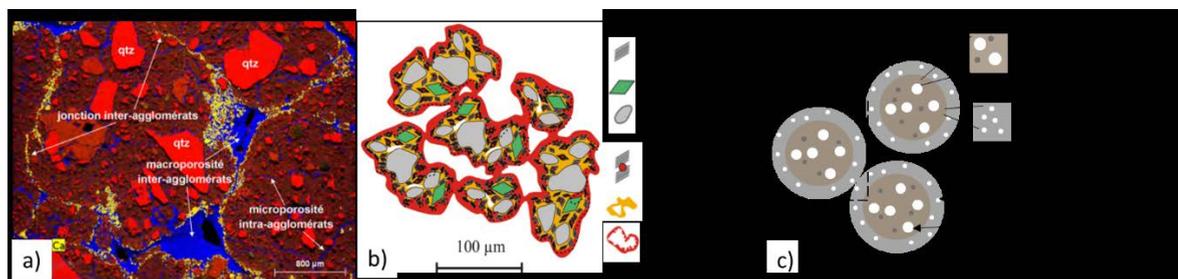


FIGURE 1. Observations au MEB, (Lemaire 2012) a), représentation schématique (Cabane 2004) b) et représentation utilisée dans l'article c).

C. Théories du modèle

Afin de vérifier les hypothèses microstructurales proposées par Cabane (Cabane 2004), une approche d'homogénéisation multi-échelle est proposée pour calculer le module d'Young du sol traité. Pour cela, les paramètres suivants doivent être définis : les fractions volumiques des éléments et leurs propriétés mécaniques (3.1), la représentation morphologique des particules (3.2) et les différentes échelles. Les hypothèses formulées dans le modèle étaient les suivantes : la porosité totale de l'éprouvette était de 36%, les hydrates formés par l'ajout de chaux n'entraient pas dans la composition de la coque d'hydrates et toute la portlandite formée était ensuite transformée en CASH. Les paramètres fixés et variables sont synthétisés dans le Tableau 3.

Le modèle représente 100 g de sol traité avec 1% de chaux et 5% de liant hydraulique. Le module du sol initial a été estimé par des mesures expérimentales et celui des pores a été supposé nul. La quantité maximale d'hydrates pouvant se former avec l'ajout du traitement a été calculée à l'aide des équations d'Åhnberg. Un degré d'avancement simplifié de l'hydratation (ne prenant pas en compte les cinétiques propres à chaque hydrate) est proposé pour représenter l'évolution de la formations des phases hydratées de la coque d'hydrates..

Le sol traité a été représenté comme un ensemble constitué de sphères concentriques à deux couches : au centre, du sol poreux avec des inclusions de pores et d'hydrates provenant de l'hydratation de la chaux dont la cinétique est plus rapide, et autour une couche homogène d'hydrates composée de CH, CSH, CASH et de pores générés par l'hydratation du liant hydraulique (Figure 2 c). Le modèle a été défini sur trois échelles de porosité : une nano-porosité de la coque d'hydrates, une micro-porosité intra-granulaire et une macro-porosité inter-granulaire. Ces fractions volumiques de pores sont variables en fonction de la quantité d'hydrates formés mais la porosité totale reste constante (égale à 36%). A l'échelle de l'éprouvette, la micro-porosité a été estimée entre 15 et 25% et la macro-porosité entre 10 et 15% en se basant sur des évolutions de distributions porales. La nano-porosité correspond aux hydrates qui sont constitués de feuillets plus ou moins denses (Stephant, 2015). A l'échelle de matrices d'hydrates, elle a été estimée entre 10% (Tennis and Jennings, 2000) et 30% (Termkhajornkit et al., 2011), ce qui correspond à une nano-porosité de 0,25 à 1% à l'échelle de l'éprouvette.

La première étape de la modélisation a consisté à trouver le module du sol sans aucune porosité, en utilisant la mesure expérimentale réalisée précédemment sur l'éprouvette de limon naturel (Tableau 1) pour en exclure la fraction volumique correspondant aux pores. Ensuite les agrégats de sol ont été représentés par une matrice de sol homogène avec des inclusions de micro-

pores et d'hydrates provenant de la chaux (CASH). Le schéma de Mori-Tanaka (Mori and Tanaka, 1973) a été utilisé pour calculer ses propriétés mécaniques homogénéisées car c'est le schéma privilégié pour les matrices avec inclusions. Ensuite, le schéma autocohérent (Hill, 1965) a été employé pour calculer les propriétés de la pâte d'hydrates (composée des différents hydrates identifiés et de la nano-porosités).

Afin de modéliser la microstructure mise en évidence par les auteurs précédents, une géométrie de sphère à n couches (Herve and Zaoui, 1993) couplée à un schéma autocohérent ont été appliqués à une couche de sol entourée d'une couche de pâte d'hydrates. La macro-porosités a été associée à l'ensemble des grumeaux de sol traité homogénéisés pour calculer les propriétés du sol à l'échelle d'une éprouvette. Pour se faire, un schéma autocohérent a été choisi (Hill, 1965).

TABLEAU 3. Données d'entrée du modèle numérique.

Paramètres d'entrées du modèle	Paramètres fixés	Paramètres variables
Quantité de chaux et de liant hydraulique ajouté	1% de chaux 5% de liant hydraulique	-
Porosité totale	36%	-
Propriétés mécaniques du sol naturel	Données expérimentales (Tableau 1)	-
Nature, densité et propriétés mécaniques des hydrates	Données issues de la bibliographie (Tableau 2)	-
Proportion de Portlandite transformée en CASH	100%	-
Avancement de l'hydratation	-	25 à 100%
Représentation morphologique		Géométrie multicouche concentriques avec 3 échelles Géométrie une échelle et agencement désordonné
Nano-porosités	-	10 à 30% à l'échelle de la matrice d'hydrates 0,25 à 1% à l'échelle de l'éprouvette
Micro et macro-porosités	-	15 à 25% et 10 à 15% à l'échelle de l'éprouvette

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure 2 montre la variation du module d'Young homogénéisé (en MPa) en fonction de la porosité dans la coque d'hydrates (en %) pour une quantité d'hydrates formés allant de 25 à 100%. La première vérification des résultats du modèle a été faite en les comparant avec les résultats expérimentaux : un module d'Young (E) de 100 MPa après 28 jours de cure (droite bleue) et de 220

MPa après 90 jours de cure (droite verte) (voir Tableau 1). En supposant que tous les paramètres étaient fixés à des valeurs les plus favorables possibles, le module d'Young homogénéisé obtenu était égal à 370 MPa. Enfin, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les principaux paramètres (voir Figure 2) : la porosité de la coque d'hydrates et la quantité d'hydrates formés.

Tout d'abord, la variation de la porosité de la coque d'hydrates est l'un des paramètres les plus difficiles à estimer. En effet, elle est souvent mesurée par des essais de porosimétrie par intrusion de mercure, mais cette méthode surestime généralement le volume des nano-pores (Diamond, 2000; Zeng et al., 2020). Ceci est dû à la faible densité de certains des hydrates formés comme les CSH, notamment dans le cas où le liant contient une part de laitier (Stephant, 2015). De ce fait, la structure de ces hydrates ne résiste pas à la pression de mercure nécessaire pour les mesurer, qui peut atteindre 150 MPa.

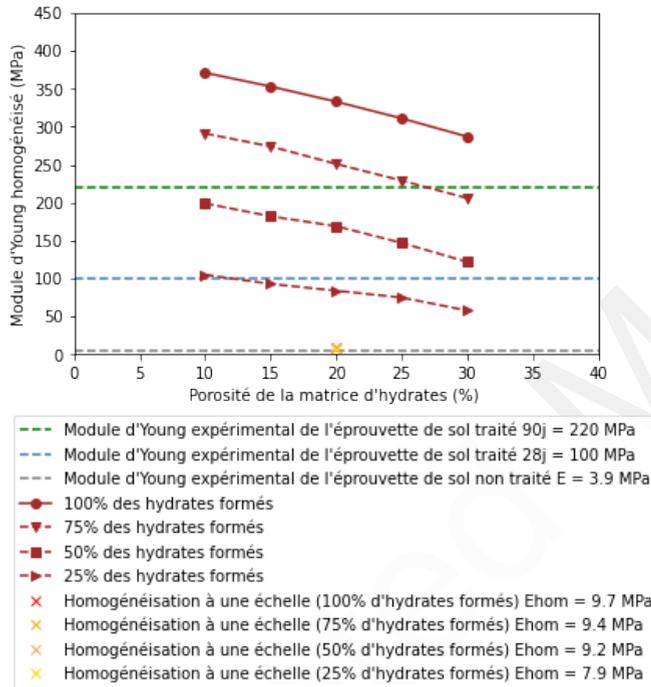


FIGURE 2. Etude de sensibilité du modèle.

Les courbes représentant 50 et 75% d'hydratation semblent valider qu'après 90 jours de cure environ 70% des phases hydratées se seraient formées.

Par ailleurs, une expérimentation numérique a été réalisée en considérant que le sol traité était constitué de particules de sol, d'hydrates et de pores aléatoirement répartis dans le sol. Pour se faire, il a été utilisé le schéma-autocohérent (Hill, 1965). Les résultats obtenus pour les modules d'Young homogénéisés sont de 7,9 MPa, 9,17 MPa, 9,43 MPa et 9,68 MPa, pour des pourcentages d'hydrates formés de, 25, 50, 75 et 100%, respectivement. Il faut noter que les fractions volumiques et les propriétés mécaniques des phases hydratées étaient les mêmes que celles du modèle multicouches. Ces résultats soulignent l'importance de la représentation morphologique du matériau traité proposée par Cabane 2004 et observée par Lemaire 2012 (cf. Figure 1) sur les propriétés mécaniques du matériau. La présence de la couche rigide entourant des grumeaux de sol naturel

Les équations de Åhnberg ne fournissent qu'une indication sur la quantité maximale d'hydrates qui peuvent être formés pour une quantité donnée de phases anhydres. D'après la littérature, le degré d'hydratation maximal des liants hydrauliques assimilés à des CEM III/A est généralement de 70% (Stephant, 2015). Ainsi, pour modéliser l'évolution de l'hydratation, la plage de variation de la quantité d'hydrates a été fixée entre 25% et 100%. Dans la Figure 2, la courbe rouge continue représente le cas où 100% des phases anhydres pourraient s'hydrater et les courbes rouges en pointillés représentent le cas où seulement 25, 50 et 75 % des hydrates sont formés.

L'encadrement de la droite verte par les

est donc nécessaire à l'obtention d'un module d'Young homogénéisé correspondant aux valeurs mesurées expérimentalement.

V. CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de vérifier par des méthodes numériques d'homogénéisation la morphologie microstructurale des sols traités (arrangement des grains et des hydrates) en calculant les propriétés élastiques homogénéisées des éprouvettes de sol et en les comparant à des modules d'Young mesurés en laboratoire. De nombreuses hypothèses ont été émises sur la base des références de la littérature (nature, quantité d'hydrates, évolution de la morphologie après traitement). Une étude de sensibilité du modèle a permis de valider l'ordre de grandeur des résultats obtenus par la variation des valeurs des paramètres principaux. De plus, le modèle numérique d'homogénéisation semble valider les observations faites par Cabane sur des éprouvettes de limon traité : des agrégats de limons entourés d'une coque d'hydrates. Il semble également valider la quantité approximative d'hydrates formés à partir des équations d'Åhnberg ainsi que l'évolution de la distribution porale. En effet, avec l'avancement des réactions d'hydratation au sein du sol traité, la porosité totale ne varie pas mais la distribution porale évolue : la famille des nano-pores correspondant aux hydrates se développe quand le volume de la microporosité diminue. Afin d'améliorer le modèle, une estimation plus précise de la nature hydrates formés et une prise en compte de leur cinétique d'hydratation pourrait être ajoutée.

VI. REMERCIEMENTS

Le projet de thèse est financé par EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT et Centrale Nantes. Nous tenons également à remercier la Société du Canal Seine Nord Europe.

REFERENCES

- Åhnberg, H., 2006. Strength of stabilised soils: a laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Department of Construction Sciences, Lund University, Lund.
- Barthélémy, J.-F., 2022. *echoes*.
- Bouras, F., 2020. Le traitement de sols argileux : Approches physico-chimique et géotechnique (Thèse de doctorat). Université d'Orléans.
- Cabane, N., 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.
- Diamond, S., 2000. Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cem. Concr. Res.* 30, 1517–1525.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00370-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00370-7)
- Hay, R., Li, J., Celik, K., 2020. Influencing factors on micromechanical properties of calcium (alumino) silicate hydrate C-(A-)S-H under nanoindentation experiment. *Cem. Concr. Res.* 134, 106088.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106088>
- Herve, E., Zaoui, A., 1993. n-Layered inclusion-based micromechanical modelling. *Int. J. Eng. Sci.* 31, 1–10. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(93\)90059-4](https://doi.org/10.1016/0020-7225(93)90059-4)
- Hill, R.J., 1965. A self-consistent mechanics of composite materials. *J. Mech. Phys. Solids* 13, 213–222.
[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(65\)90010-4](https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90010-4)

- Jacquemot, F., 2014. Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton (Thèse de doctorat). Lille 1.
- LCPC/SETRA, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide de Traitement des sols (GTS) (No. Réf. D9924). LCPC.
- Lemaire, K., 2012. Evolution des caractéristiques physico-chimiques, microstructurales et hydromécaniques de limon traités aux liants lors d'une circulation d'eau (Thèse de doctorat).
- Maubec, N., 2010. Approche Multi-Echelle du Traitement des Sols à la Chaux - Etudes des Interactions avec les Argiles (Thèse de doctorat). Université de Nantes, Nantes.
- Monteiro, P.J.M., Chang, C.T., 1995. The elastic moduli of calcium hydroxide. *Cem. Concr. Res.* 25, 1605–1609. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00154-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00154-9)
- Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metall.* 21, 571–574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- Nguyen, T.T.H., 2015. Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel (phdthesis). Université Paris-Est.
- Serratrice, J.-F., 2018. Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. *Rev. Fr. Géotechnique 1*. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019001>
- Stephant, S., 2015. Etude de l'influence de l'hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires (Thèse de doctorat). Université de Bourgogne.
- Tennis, P., Jennings, H., 2000. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 30, 855–863. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00257-X)
- Termkhajornkit, P., Chen, J., Guillon, E., 2011. Analysis of Chemical Shrinkage Experiments on Blended Cement Pasted Via a Coupled Thermodynamic/Kinetic Hydration Model.
- Zeng, Q., Chen, S., Yang, P., Peng, Y., Wang, J., Zhou, C., Wang, Z., Yan, D., 2020. Reassessment of mercury intrusion porosimetry for characterizing the pore structure of cement-based porous materials by monitoring the mercury entrapments with X-ray computed tomography. *Cem. Concr. Compos.* 113, 103726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103726>