
Caractérisation du début de consolidation des sols de très forte teneur en eau.

Quoc-Duy Nguyen, Gilbert Le Bras, Nathaly Barbry, Alain Alexis

Laboratoire GeM, Institut de Recherche en génie Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183

Département Génie Civil

IUT de Saint Nazaire

58 rue Michel Ange

44600 Saint Nazaire

quoc-duy.nguyen@univ-nantes.fr, gilbert.lebras@univ-nantes.fr,

nathaly.barbry@univ-nantes.fr, alain.alexis@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. *L'étude de la sédimentation et de la consolidation des sols de très forte teneur en eau présente un grand intérêt scientifique par son aspect interdisciplinaire à la frontière hydraulique et géotechnique, et par l'importance de ses applications à la gestion des zones côtières aménagées ou naturelles, estuariennes, littorales et des boues industrielles. La démarche scientifique associe des méthodologies issues des approches hydraulique et géotechnique et comporte la réalisation d'un banc gamma-densimétrique asservi, d'essais paramétriques, d'un code de traitement et d'une analyse de représentativité des lois de comportement. Une comparaison entre l'expérimentation et la modélisation permet de simuler le comportement de certains sols fins.*

ABSTRACT. *The study of sedimentation and consolidation of high-water-content soils is of great scientific interest with an interdisciplinary aspect at the hydraulic and geotechnical boundary, and with the importance of its application to the management of coastal zones, whether they are artificial or natural, and estuarine or littoral. This study deals with the geotechnical formation of high-water-content soils with the development of an experimental laboratory sedimentation/consolidation bench, with parametric tests, with a simulation code and with an analysis concerning the representatives of constitutive laws.*

MOTS-CLÉS : *géotechnique, sédimentation/consolidation, ségrégation, pression interstitielle, contrainte effective, perméabilité.*

KEYWORDS: *geotechnical, sedimentation/consolidation, segregation, pore pressure, effective stress, permeability.*

1. Introduction

Depuis plusieurs années des besoins accrus se font sentir dans la connaissance du comportement du début de consolidation des sols de très forte teneur en eau. De nombreux problèmes s'y trouvent rattachés ; citons par exemple : les problèmes de trafic maritime ou portuaire, le dragage, l'évolution des fonds, les transports de sédiments... Ces différents champs nécessitent une prédiction de l'évolution des concentrations en sédiments, de leur hauteur et de leur résistance, en fonction du temps et des actions extérieures.

Le phénomène de sédimentation/consolidation est un processus physique continu dans l'espace et dans le temps. La théorie de sédimentation est basée sur la théorie de Kynch (Kynch, 1952) et la théorie de consolidation est adaptée aux grandes déformations grâce aux travaux de Gibson (Gibson *et al.*, 1967, 1981).

Lors du processus de sédimentation/consolidation de sédiments naturels, l'interaction de plusieurs phénomènes complexes peut apparaître tels que : la floculation, la ségrégation (d'éléments plus grossiers dans une mixture d'éléments fins), la compressibilité des phases (en raison de la présence de matière organique), ou encore le fluage sous faible contrainte de consolidation.

Dans cet article, le phénomène de ségrégation a été étudié. La ségrégation est le processus qui caractérise la forte différence de vitesse de chute entre les particules les plus fines et les plus grossières (grains de sable) d'un sol de forte teneur en eau lors de sa sédimentation. Dans ce cas, après un certain temps, dans la couche de sédiment trois zones peuvent apparaître : une zone au fond avec des particules grossières, une zone en surface avec des particules fines et une zone intermédiaire (Davis, 1996). Les essais en laboratoire montrent les influences du phénomène ségrégation délicates et souvent négligées sur le comportement différencié des éléments grossiers et d'une pâte constituée des éléments fins et de l'eau.

2. Expérimentations

2.1. Système expérimental

Pour réaliser des études paramétriques en laboratoire, un banc gamma-densimétrique asservi auscultant une colonne de sédimentation a été amélioré. Ce système (figure 1) a été développé depuis plusieurs années par Alexis et Le Bras (Alexis *et al.*, 2004, Le Bras, 2000). Il permet de mesurer la densité du sédiment par un rayonnement gamma émis par une source qui traverse diamétralement la colonne de sédiment (de hauteur 1,5m et de diamètre 100 mm), sans remaniement de ce matériau très fragile. Les impulsions électriques du scintillomètre sont comptées par un ordinateur dédié qui les convertit en densité. Les surpressions interstitielles sont mesurées par un capteur de pression très sensible (sensibilité de ± 3 Pa) connecté automatiquement aux 10 prises de pression réparties sur la colonne.

Après le traitement semi-automatique des mesures, les résultats sont représentés graphiquement sous forme de profils. Les deux types de mesures effectuées sont les concentrations volumiques et les surpressions. Un essai typique consiste en l'auscultation d'une colonne de 1,5 m de hauteur contenant un sédiment préparé à 100 g/l. Les mesures sont réalisées sur une durée allant de 1,33 mn à 32 jours en progression géométrique. On peut remarquer la très bonne qualité des profils de surpression bien que les valeurs soient très faibles.

Les mesures sont effectuées dans une chambre froide, la température étant régulée 10°C pour éviter l'influence de la décomposition des matières organiques.

Le système est adapté aux différents types de sols naturels ou matériaux artificiels (kaolin, boue industrielle) de très forte teneur en eau. Les lois de comportement d'un sol en cours de sédimentation/consolidation (contrainte effective, perméabilité) peuvent être déterminées par dépouillement des profils de densité et de surpression interstitielle.

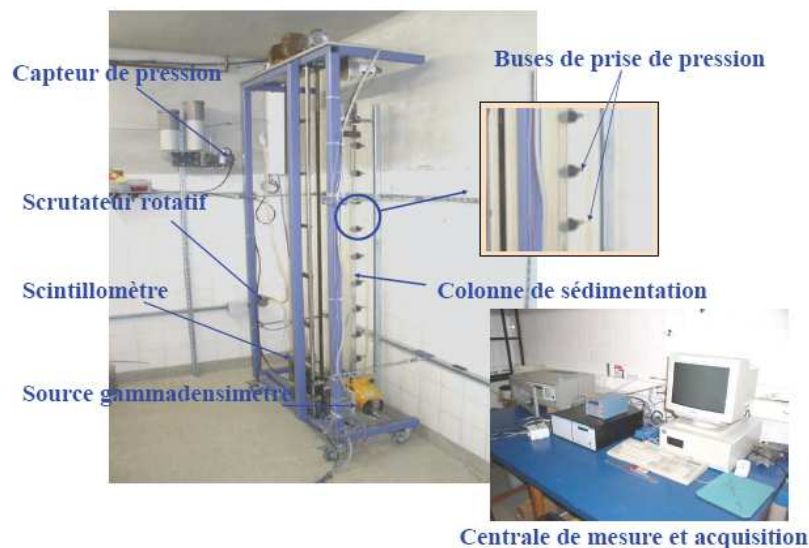


Figure 1. *Système expérimental de laboratoire (banc gamma-densimétrique asservi)*

2.2 Caractéristiques des matériaux étudiés

Deux matériaux ont été étudiés dans cet article : le kaolin et la vase naturelle de Méan (Loire, France). La concentration initiale de ces matériaux est de 100 g/l ce qui correspond à une concentration volumique de 0.036. Le tableau 1 synthétise les principales caractéristiques des matériaux étudiés.

Tableau 1. Caractérisations des matériaux étudiés

Matériau	d ₅₀ μm	Granulométrie passant à 63μm	Limite de liquidité WL%	Limite de plasticité WP%	G _s	G _w
Kaolin	2%	4%	64,5	32,2	2,7	1
Vase de Méan	20%	77%	84	53	2,7	1.01

2.3 Résultats expérimentaux

En observant les profils de concentration volumique de kaolin (figure 2a), on constate que pendant le premier stade du processus ($t = 1.33$ mn), les sédiments se comportent comme une suspension dont le poids des particules est supporté par la phase fluide et dont la concentration volumique reste proche de sa valeur initiale. Au fur et à mesure que le tassement progresse, les profils mettent en évidence l'accumulation de sédiment au fond de la colonne de sédimentation. Cette évolution se traduit sur les profils de densité.

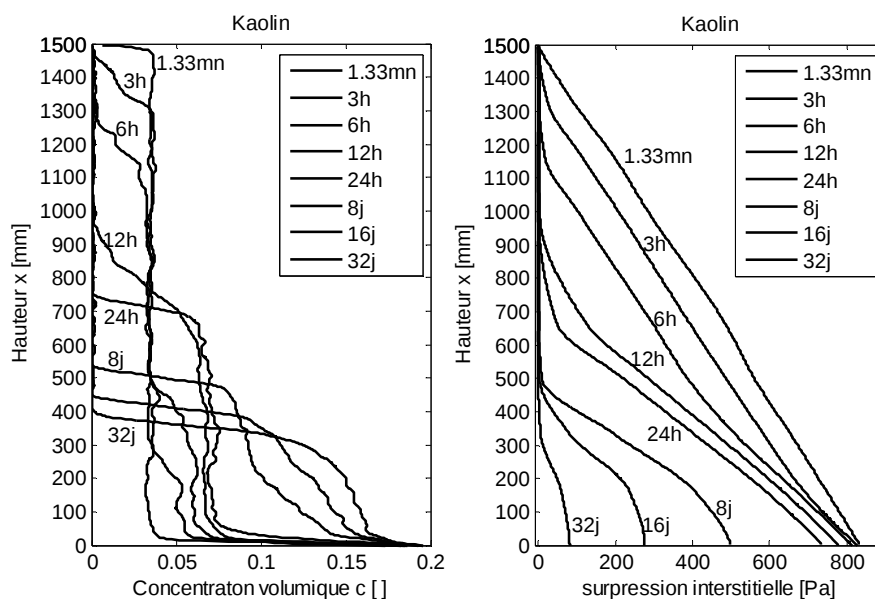


Figure 2. Profils de concentration volumique (a) et de surpression interstitielle (b) du kaolin 100g/l

Pendant le premier stade du processus, les courbes de surpression interstitielle sont très proches et quasiment rectilignes (répartition triangulaire) ce qui est dû à une contrainte quasi-nulle dans la partie supérieure de la colonne puis ces courbes s'écartent régulièrement dans la partie inférieure (figure 2b) avec l'augmentation des

contraintes effectives. Au cours du temps les surpressions se dissipent lentement dans le dépôt. Il y a une dissipation rapide des surpressions interstitielles en tête de colonne et plus lente au fond.

Sur les mêmes profils mais dans le cas de la vase naturelle de Méan, on constate une même évolution générale avec cependant l'existence d'un pic de concentration au fond en raison de la ségrégation de particules grossières (figure 3a).

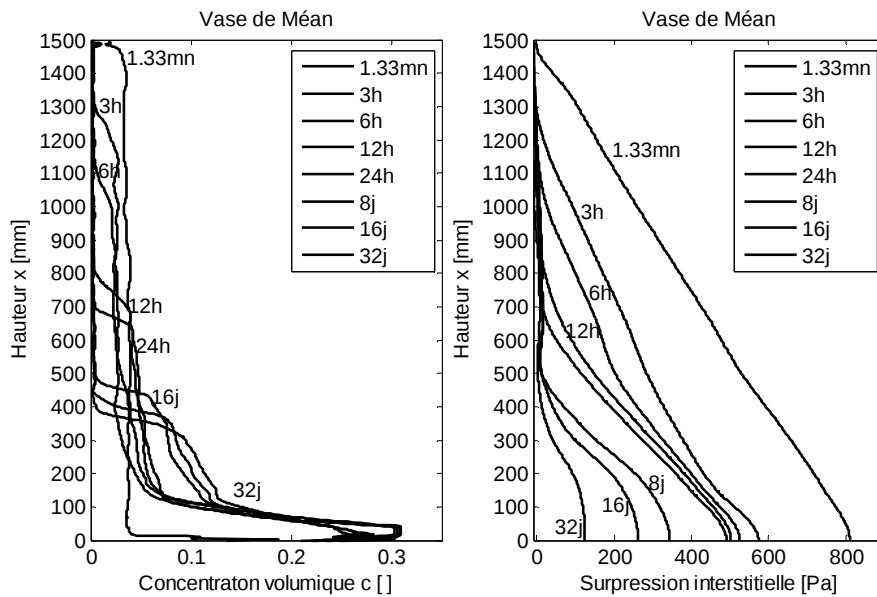


Figure 3. Profils de concentration volumique (a) et de surpression interstitielle (b) de la vase de Méan 100g/l

Le dépouillement de ces profils permet l'étude des lois de comportement relatives à la contrainte effective et à la perméabilité réduite (qui est le produit de la perméabilité par la concentration). Ces dernières sont étudiées en fonction de la concentration volumique et de la contrainte totale nette (qui est la contrainte totale moins la pression hydrostatique) (figure 4).

On peut synthétiser le comportement du kaolin à 100 g/l par une loi de contrainte effective et une loi de perméabilité réduite (loi 1 et loi 2, figure 4a et 4b). Par contre, la vase naturelle de Méan, dont le comportement est basé sur le comportement différencié des particules grossières chute plus vite (le phénomène de ségrégation) et d'une pâte des particules fines présente plutôt 3 lois de comportement (en surface,

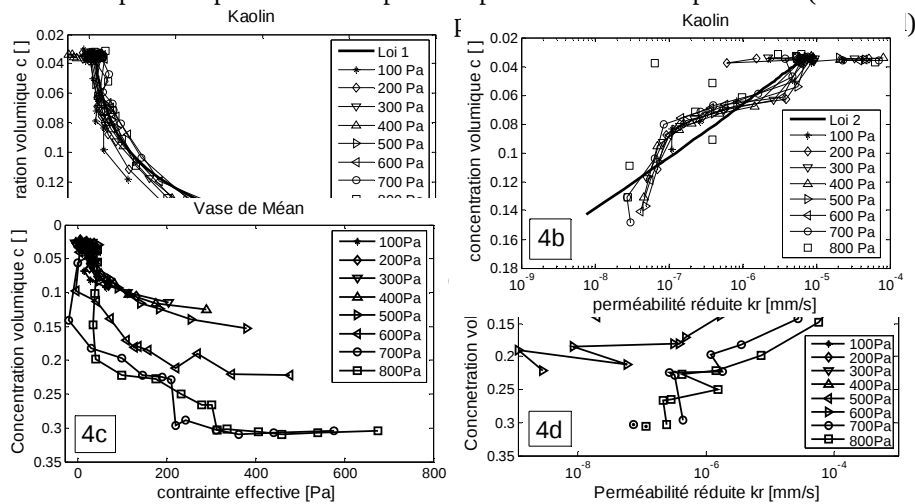


Figure 4. Evolution de la contrainte effective et de la perméabilité réduite en fonction de la concentration volumique de kaolin à 100g/l (4a, 4b) et de la vase Méan 100g/l (4c, 4d)

3. Modèle numérique

3.1. Equations principales

Le phénomène de sédimentation/consolidation est décrit par les équations principales : équations de conservation de la matière, équations d'équilibre mécanique, équations d'état, loi de Darcy et loi de contrainte effective. La combinaison de ces équations nous donne une équation hyperbolique non linéaire du deuxième ordre dans un système de coordonnées naturelles composé de deux variables indépendantes (x , t). L'équation du processus de sédimentation/consolidation [1] se présente sous la forme suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\gamma'_s}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial x} (c \cdot k_r) - \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \cdot \frac{\partial \sigma'_v}{\partial x} \right) = 0 \quad [1]$$

avec respectivement γ'_s et γ_w les poids volumiques déjaugés des grains et de l'eau.

A l'aide des lois de comportement retenues et des conditions aux limites, l'équation [1] est résolue en utilisant la méthode des différences finies (modèle 1DV). Les résultats de la simulation (figure 5) pour le kaolin montrent un bon accord global entre l'évolution des profils de concentration mesuré et simulé.

Ce code devra être étendu pour la prise en compte du phénomène de ségrégation présent dans l'essai concernant la vase Méan.

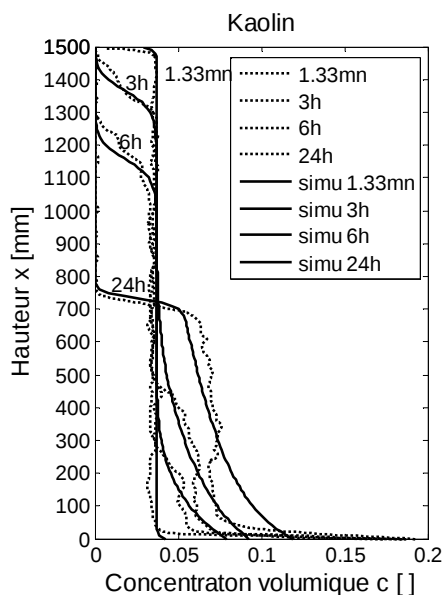


Figure 5. *Résultats de simulation pour le kaolin 100g/l*

4. Conclusion

Le système expérimental et la simulation présentés semblent permettre de caractériser de manière satisfaisante le début de la consolidation d'un sol fin simple comme le Kaolin. Cependant la caractérisation d'un sédiment naturel nécessite un approfondissement de la modélisation de la ségrégation. D'autre part, l'algorithme sera amélioré afin de réduire les temps de calcul.

Les applications scientifiques et industrielles de cette étude sont principalement la gestion environnementale des envasements des souilles, chenaux et retenues de barrage, ainsi que l'amélioration de la connaissance de l'augmentation de la densité et de la résistance d'un dépôt sédimentaire, dans le cadre d'un meilleur suivi du fonctionnement d'un ouvrage hydraulique en liaison avec la qualité de l'eau et de l'environnement.

Notre démarche interdisciplinaire permet d'ouvrir de nombreuses perspectives de recherche sur la liaison hydraulique-géotechnique dans les milieux littoraux, estuariens, portuaires ou lacustres.

5. Bibliographie

- Alexis A., Le Bras G., and Thomas P., "Experimental bench for study of settling-consolidation soil formation", *Geotechnical Testing Journal*, vol.27, n°6, 2004, p. 557-567.
- Davis R. H., "Velocities of sedimenting particles in suspensions", *Advances in fluid mechanics*. Southampton: Computational mechanics publications. Chap. 6, p. 161-198.
- Gibson R. E., England G. L., and Hussey M. J. L., "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays", *Géotechnique*, vol.17, n°3, 1967, p. 261-273.

- Gibson R. E., Schiffman R. L., and Cargill K. W., "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers", *Canadian Geotechnical Journal*, vol.18, n°2, 1981, p. 280-293
- Kynch G. J., "A theory of sedimentation", *Trans. Faraday Soc.*, vol.48, 1952, p. 166-176.
- Le Bras G., "Etude Expérimentale du Début de Consolidation de Sédiments Fins Naturels", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2000.