

---

# Modélisation du comportement différé de la bentonite compacte par une méthode d'homogénéisation numérique

DAHHAOUI Hachimi<sup>1</sup>, BELAYACHI Naima<sup>2</sup>, ZADJAOUI Abdeldjalil<sup>1</sup>, DUC Myriam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire RISAM, DGC/FT ; Université de Tlemcen, Algérie, dahhaoui\_hachimi@hotmail.com

<sup>2</sup> Université d'Orléans, INSA-CVL, PRISME, EA 4229, 8 Rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex 2, France

<sup>3</sup> Université Paris Est, IFSTTAR, 77447 Marne-la-vallée, France

---

*RÉSUMÉ.* Cette étude est consacrée à la modélisation du comportement au fluage des géo-matériaux en utilisant une méthode d'homogénéisation numérique basée sur une microstructure périodique. Le matériau étudié dans cette investigation est prélevé du gisement de Hammam Bouhrara situé à l'ouest Algérien. Une caractérisation physicochimique avec une observation microstructurale a été réalisée sur le matériau dit bentonite tout venant afin de choisir le volume élémentaire représentatif utilisé dans la modélisation numérique. Le comportement différé du matériau est étudié dans un premier temps au moyen d'essai de fluage de courte durée en utilisant un essai oedométrique haute pression. Le matériau a été modélisé en utilisant une cellule de base (VER) composée d'une matrice argileuse et un pore sphérique avec des conditions de périodicité. Les paramètres du modèle de fluage utilisé ont été déterminés à partir d'une analyse inverse en utilisant les résultats expérimentaux. La confrontation des résultats numériques et expérimentaux montre la capacité prédictive de la modélisation micro-macro numérique proposée.

*ABSTRACT.* This study is devoted to the modeling of the creep behavior of geomaterials by using a numerical homogenization method based on periodical microstructure. The studied material was taken from the ground of Hammam Bouhrara located in western Algeria. A physicochemical characterization with a microstructural observation was carried out on the so-called Bentonite (Bental) in order to describe the representative elementary volume used for numerical modeling. The deferred behavior of the material is studied at first by short-time creep test by using a high pressure oedometer test. The material was modeled using a unit cell composed of a clay matrix and a spherical void with periodic boundary conditions. The parameters of creep model were identified by using an inverse method based on experimental results. The comparison of the numerical and experimental results shows the predictive capability of the proposed numerical homogenization modeling.

*MOTS-CLÉS :* Test de fluage, bentonite, œdomètre, homogénéisation numérique,

*KEY WORDS :* Creep test, bentonite, oedometer, numerical homogenization

---

## 1. Introduction

La plupart des sols fins naturels montrent un comportement dépendant du temps et de la vitesse de déformation. Si pendant des années, les ingénieurs et les scientifiques se sont intéressés à la stabilité des sols pour la conception et la réalisation des projets, la prise en compte du comportement différé, sa compréhension et sa modélisation est d'une importance capitale ces dernières années. , Connues par une faible perméabilité et des propriétés mécaniques qui leurs confèrent certaines qualités, les argiles sont envisagées comme l'un des éventuelles barrières pour le stockage des déchets radioactifs [FOU 09] ou dans les noyaux de barrages ou encore dans les gisements des puits pétroliers. Dans ce contexte, la prédiction du comportement à long terme est nécessaire afin d'assurer la pérennité et la sûreté de ces ouvrages. La bentonite gonflante est un exemple de matériau utilisé dans les applications citées et par conséquent largement étudiée. La modélisation du comportement différé des géomatériaux a fait l'objet de plusieurs investigations mais reste encore un sujet qui suscite l'intérêt des chercheurs.

L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation du comportement de fluage de la bentonite en utilisant une méthode d'homogénéisation numérique. Le matériau utilisé dans le cadre de cette étude est une bentonite tout venant, extraite de la région de Maghnia (ouest d'Algérie). L'étude expérimentale menée sur ce dernier, vise à mettre en place un test de fluage de longue durée de la bentonite compacte qui servira en même temps à valider la modélisation micromécanique. La particularité du modèle tient dans la prise en compte pour la matrice argileuse de la viscosité combinée avec l'élasticité et l'évolution de la porosité d'échantillon au cours d'un essai de fluage sur chemin œdométrique.

## 2. Matériau et dispositif expérimental

### 2.1. Matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est une argile type montmorillonite classée comme bentonite, il s'agit d'un matériau naturel tout venant, extrait du gisement de Hammam Boughrara (Maghnia) dans l'ouest Algérien. C'est une bentonite comme le montre l'analyse quantitative (effectuée à l'IFSTTAR-paris) par la méthode Rietveld qui révèle les pourcentages de différentes phases : montmorillonite (44,36%), amorphe (22,77%), quartz (12,33%), Feldspath (8,06%), RWP (7,09) et un faible pourcentage d'autres constituants : illite (3,81%), calcite (1,46%), et l'anatase (0,12%). Les résultats des analyses physicochimiques sont résumés dans le tableau 1 et 2. La bentonite tout-venant est classée parmi les sols argileux très plastiques (At) selon la classification LCPC.

**Tableau 1.** Analyse chimique de la bentonite tout venant

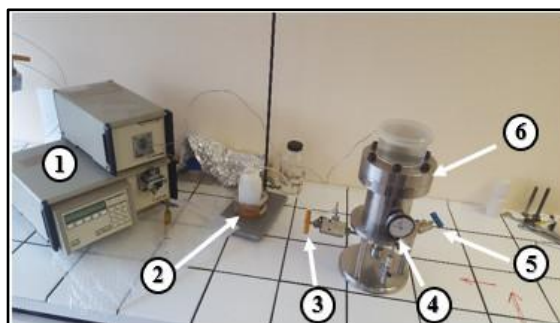
Si (%)	Al (%)	Ti (%)	Fe (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)
26,14	7,74	0,07	1,49	1,03	1,83	3,83	1,44

**Tableau 2.** Propriétés physiques de la bentonite tout venant

% < 2 $\mu\text{m}$	% < 80 $\mu\text{m}$	$w_l$ (%)	$I_p$ (%)	SST (m <sup>2</sup> /g)	$w_{OPN}$ (%)	$G_{d_{OPN}}$
89	74	140,36	89,57	528,36	24,22	1,42
NFP 94-56/57		NFP 94-51	-	NFP 94-68	NFP 94-093	

### 2.2. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental simulant les conditions œdométriques a été monté et utilisé (figure 1). L'œdomètre haute pression est utilisé pour compacter et préparer les échantillons (à faible contrainte 0,2 MPa) et ensuite à réaliser le test de fluage sous contrainte constante.



Des éprouvettes préparées à l'optimum Proctor ayant un diamètre de 65 mm et une hauteur égale à 20 mm ont été confectionnées. Dans un premier temps les tests de fluage réalisés sont de courte durée (7 jours, 21 jours). Des tests de plus longue durée seront considérés dans un futur immédiat de ce travail.

### 3. Résultat

La figure 2 montre les résultats d'essai mené avec les pressions verticales, 0,5, 1, 2, 3, 5 et 10 MPa appliquées par palier successivement après le compactage de l'échantillon. L'essai consiste à mesurer le tassement de l'éprouvette pendant une période d'au moins 7 jours suivant la procédure des laboratoires des ponts et chaussées [MIE 85], hormis pour les chargements à 1 MPa et 10 MPa qui ont été prolongés respectivement de 10 jours et 9 jours pour s'assurer de la stabilité des déformations. Les courbes obtenues permettent de déduire l'indice de fluage  $C_{ae}$  pour chaque valeur de chargement.

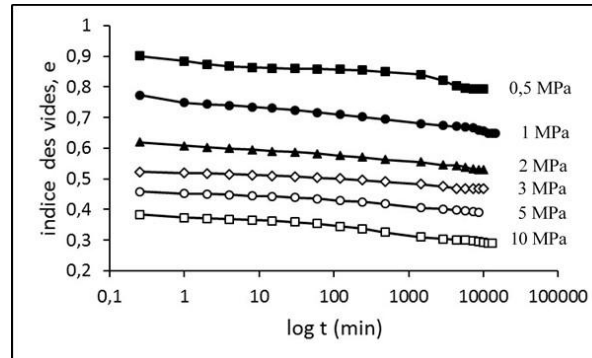


Figure 2. Indice des vides, en fonction de  $\log t$ .

Dans ces conditions la contrainte latérale peut être déduite à partir du coefficient des terres au repos. Cette hypothèse qui semble très grossière est pleinement justifiée par des travaux antérieurs (MES 93) (ELK 16).

### 4. Modélisation micromécanique du comportement de fluage

La modélisation micromécanique vise à obtenir le comportement homogène macroscopique équivalent à partir d'un volume élémentaire représentatif VER du matériau hétérogène [BEL 06].

#### 4.1. Microstructure et conditions aux limites

Les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB), montrent l'existence d'une porosité importante à l'intérieur de la matrice argileuse (Figure 3). Une représentation 3D de la microstructure pourrait être un ensemble de cellules périodiques cubiques composées de deux phases (Matrice argileuse accompagnée d'une phase poreuse). Le pourcentage de la fraction poreuse est pris en compte à partir des mesures de porosité réalisées en utilisant la porosimétrie à mercure, soit 41,96 %. La modélisation est menée par le code d'élément finis ANSYS 14, la figure 3 montre le VER et les conditions aux limites du modèle.

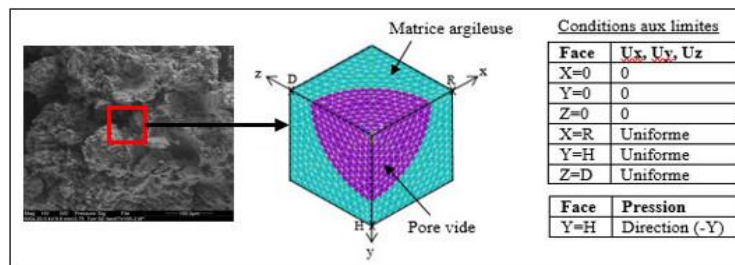


Figure 3. Modèle de cellule unitaire et conditions aux limites, (a : analyse MEB sur surface fraîchement cassée de l'éprouvette lyophilisée, b : cellule cubique périodique (VER), c : conditions aux limites)

#### 4.2. Formulation du modèle et résultats

La loi de comportement choisie est celle dite « Modified Time Hardening », elle décrit le comportement de fluage lié à la viscosité de la matrice argileuse (Eq. [1]). La contrainte équivalente est calculée à partir du rapport de la contrainte verticale ( $\sigma_1$ ) et la contrainte latérale ( $\sigma_3$ ). Dans l'absence des mesures de la contrainte latérale, ce

rapport est actuellement pris de la littérature [MES 99]. L'identification des paramètres du comportement local de la matrice argileuse est conduite par la méthode des moindres carrés basée sur la minimisation de la somme des carrés des écarts entre le résultat du calcul numérique et de la courbe expérimentale. L'influence de la variation de la température est négligée actuellement, le coefficient C4 lié à la température est nul. Les valeurs des paramètres C2, et C3 sont 1,73 et -0,85 respectivement. Le coefficient C1 est dépendant de l'indice des vides (figure 4), il est considéré comme variable interne dans le modèle. Les propriétés élastiques sont prises à partir de la littérature [GIR 99], avec  $E=7600$  MPa et,  $\nu =0,27$ . Cependant, pour un caractère semblable à celui du vide, le pore est modélisé par des propriétés élastiques linéaires de très faibles valeurs. Enfin, l'homogénéisation numérique du problème est menée par le calcul des moyennes volumiques des déformations microscopiques selon le théorème de Hill (Eq. [2]). La comparaison entre le résultat de simulation concorde avec le résultat de test (figure 5), cela met en valeur la capacité prédictive de la modélisation proposée en utilisant une homogénéisation numérique.

$$\varepsilon(t) = \frac{C1}{C3 + 1} \sigma^{C2} t^{C3+1} e^{-\frac{C4}{T}} \quad [1]$$

$$\langle \varepsilon^{creq} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon^{creq} \quad [2]$$

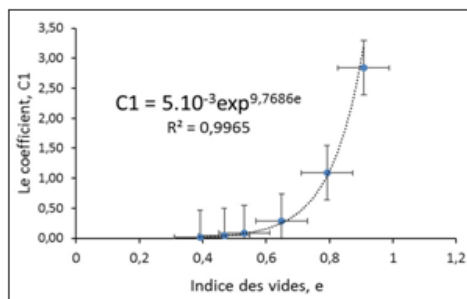


Figure 4. Relation entre C1 et indice des vides

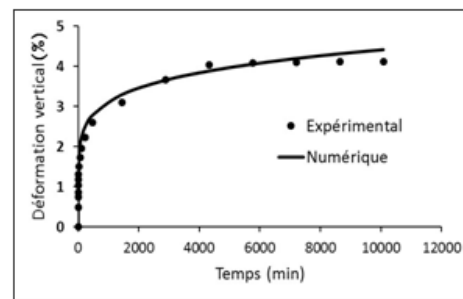


Figure 5. Evolution des déformations verticales avec le temps. Chargement 3 MPa

## 5. Conclusion

L'objectif de ce travail a été de proposer une modélisation micromécanique basé sur une méthode numérique d'homogénéisation périodique pour la simulation du comportement au fluage de la bentonite compacte. Sur la base d'observations des images au MEB, la microstructure de la bentonite est décrite par une matrice poreuse. Un modèle de type « Modified Time Hardening » a été utilisé pour la description du comportement de fluage lié à la viscosité de la phase argileuse. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux a mis en évidence la capacité de l'approche d'homogénéisation numérique dans la modélisation des comportements complexes tels que le fluage. La continuité immédiate de ce travail est de réaliser et de modéliser un test de fluage de longue durée avec la prise en compte de la température et l'humidité.

## 6. Bibliographie

- [ELK 16] ELKADY T., ABBAS M.F., et SHAMRANI M.A., « Behavior of compacted expansive soil under multi-directional stress and deformation boundary conditions » *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 75, n° 4, 2016, p. 1741-1759.
- [MIE 85] MIEUSSENS C., et SOYEZ B., Essais de compressibilité à l'œdomètre. Procédures recommandées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées, BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS, 139, 1985.
- [BEL 06] BELAYACHI N., Analyse du comportement des polymères chocs avec la prise en compte de l'endommagement par cavitation, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2006.
- [MES 99] MESBAH I., MOREL J.C., et OLIVIER M., « Clayey soil behaviour under static compaction test », *Materials and structures*, vol. 32, n° 223, 1999, p. 687-694.

- [GIR 99] GIRAUD A., HUYNH Q.V., HOXHA D., et KONDO D., « Effective poroelastic properties of transversely isotropic rock like composites with arbitrarily oriented ellipsoidal inclusions », *Mechanics of materials*, vol. 39, n° 11, 2007, p. 1006-1024.