

Modélisation du comportement visqueux de l'argile naturelle

Zhenyu YIN

Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique UMR CNRS 6183,1 rue de la Noë, BP
92101, 44321 Nantes Cedex 3

RESUME. Le but de cette étude est de présenter le développement d'un modèle elasto-viscoplastique pour l'argile normalement consolidée. Une équation constitutive tridimensionnelle a été dérivée basée sur le cadre de la théorie de la surcontrainte de Perzyna et du modèle Cam-Clay Modifié. Elle a été implantée dans un programme d'éléments finis CESAR_LCPC, et appliquée pour analyser le comportement visqueux de l'argile. L'influence de deux paramètres visqueux, qui peuvent être déterminés par les essais de compression à vitesse de déformation constante, a été étudiée. Le modèle proposé a été vérifié en utilisant les résultats d'essai au laboratoire sur plusieurs argiles d'origines diverses, comprenant des essais pressio-triax sur l'argile de Saint-Herblain. Les résultats ont prouvé que le modèle peut d'une manière satisfaisante décrire les effets du comportement visqueux de l'argile tel que l'influence de la vitesse de chargement, le fluage et la relaxation.

MOTS-CLÉS : Elasto-viscoplasticité, Cam-Clay Modifié, Théorie de Perzyna.

ABSTRACT. The purpose of this study is to present the development of an elasto-viscoplastic model for normally consolidated clay. A three dimensional constitutive equation was derived based on the framework of Perzyna's overstress theory and Modified Cam-Clay model. It was implemented in a finite element program CESAR_LCPC, and applied to analyze the time-dependent behavior of soft clay. The influence of two viscous parameters, which can be determined by constant strain rate compression tests, was studied. The proposed model was verified using observed laboratory responses of several natural clays including pressio-triax tests on Saint-Herblain clay. The results showed that the model can satisfactorily describe the stress-strain-rate behavior such as strain rate effect, creep and stress relaxation.

KEYWORDS: Elasto-viscoplasticity, Modified Cam-Clay, Perzyna's theory.

1. INTRODUCTION

De nombreux modèles intégrant le comportement visqueux des sols fins ont été proposés dans la littérature (par exemple, Adachi et Oka, 1982 ; Hinchberger, 1996 ; Fodil et al., 1997 ; Zhang, 2003), mais n'ont pas été largement appliqués dans la domaine géotechnique. Le but de cette étude est de développer un modèle viscoplastique assez simple pour être facilement calibré et employé pour les projets géotechniques.

Dans cette étude, deux thèmes principaux sont présentés : (i) Etude du modèle élasto-viscoplastique : équations constitutives et leur intégration dans un programme d'éléments finis, étude la fonction de multiplicateur viscoplastique ainsi que de l'influence des paramètres visqueux ; (ii) Vérification expérimentale du modèle : capacité du modèle à simuler le comportement de l'argile en simulant des essais oedométriques, triaxiaux et pressio-triax, et proposer une méthodologie d'identification des paramètres du modèle.

2. ETUDE DU MODELE ELASTO-VISCOPLASTIQUE DE CAM-CLAY MODIFIE (EVP-MCC)

2.1. MODELE EVP-MCC

A partir du travail d'Adachi et Oka (1982), on définit un critère statique « f_s » qui représente une surface limite de référence pour le matériau. Sa taille initiale dépend de la pression de préconsolidation « p_c^s ». L'expansion de la surface statique, qui décrit l'érouissage du matériau, est exprimée par la variation de la pression de préconsolidation due à la déformation volumique viscoplastique « ε_v^{vp} » :

$$\partial p_c^s = p_c^s \cdot \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \cdot \partial \varepsilon_v^{vp} \quad \text{ou} \quad p_c^s = p_{c0} \cdot \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^{vp}\right) \quad [\text{Eq. 1}]$$

La surface dynamique « f_d » est définie pour décrire l'état de contrainte actuel, et s'écrit comme suit :

$$f_d = \frac{q^2}{M^2} + p' \cdot (p' - p_c^d) = 0 \quad [\text{Eq. 2}]$$

Basé sur le concept de « p_c^s » et « p_c^d », la fonction de multiplicateur viscoplastique « $\mu \Phi(F)$ », qui donne l'amplitude de la vitesse de déformation viscoplastique, peut s'écrire en forme de puissance ou exponentielle comme suit :

$$\mu \cdot \phi(F) = \mu \cdot \left(\frac{p_c^d}{p_c^s} - 1\right)^N \quad \text{ou} \quad \mu \cdot \phi(F) = \mu \cdot \left(\exp\left[N \cdot \left(\frac{p_c^d}{p_c^s} - 1\right)\right] - 1\right) \quad [\text{Eq. 3}]$$

où, « μ » et « N » sont des paramètres visqueux du modèle. La loi d'écoulement adoptant la forme proposée par Perzyna (1966) s'écrit comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \mu \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial f_d}{\partial \sigma'_{ij}} \quad [\text{Eq. 4}]$$

où, la fonction de MacCauley est exprimée comme : $\langle F \rangle = \begin{cases} 0 & \text{pour } F \leq 0 \\ F & \text{pour } F > 0 \end{cases}$.

Tenant compte du comportement élastique, les équations constitutives de ce modèle sont obtenues comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\dot{s}'_{ij}}{2G} + \frac{\dot{p}'}{3K} + \mu \langle \phi(F) \rangle \left(\frac{3s'_{ij}}{M^2} + (2p' - p_c^d) \frac{\delta_{ij}}{3} \right) \quad [\text{Eq. 5}]$$

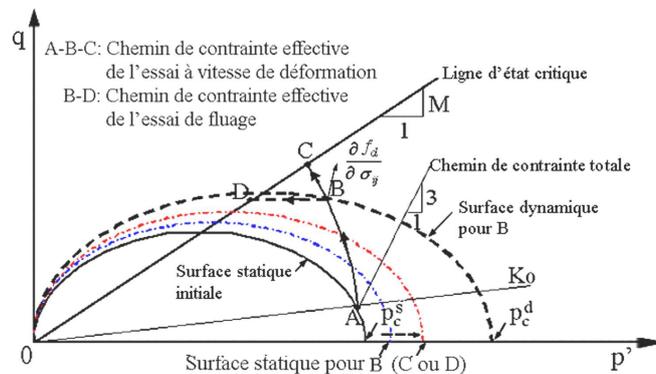


Figure 1. Principe du modèle EVP-MCC.

Le principe du modèle viscoplastique EVP-MCC est présenté sur la Figure 1. Pour un matériau dans l'état de consolidation initiale anisotrope représenté par « A », on réalise un essai non-drainé à une vitesse de déformation constante suivant le chemin « A-B-C ». Lorsque l'état de contrainte arrive en « B », la surface initiale évolue jusqu'à la surface calibrée par « pcs ». On suppose qu'il existe une surface dynamique qui passe par le point « B » et est calibrée par « pcd ». Ce critère de surface dynamique donne la direction de la déformation viscoplastique à l'aide d'un potentiel associé. La distance de ces deux surfaces est le paramètre de la fonction de multiplicateur viscoplastique, et est fonction de « pcs » et de « pcd ».

L'arrangement d'éléments finis de ce modèle EVP-MCC est similaire à celui présenté par Oka et Adachi (1986) et Hinchberger (1996). Les détails de l'analyse de consolidation couplée basée sur la théorie de Biot peuvent être trouvés dans Zienkiewicz and Taylor (1989).

Pour la fonction de multiplicateur viscoplastique, on adopte celle de forme exponentielle qui permet de limiter l'évolution de la contrainte déviatorique maximale avec la vitesse de déformation, ce qui élargit donc le domaine d'application du modèle viscoplastique, comme précisé par Fodil et al. (1997). Ainsi, la fonction en forme exponentielle est retenue dans le reste de l'étude.

2.2. ETUDE DES PARAMETRES DU MODELE

Dans le modèle EVP-MCC, sept paramètres doivent être déterminés pour calibrer le comportement élasto-viscoplastique du sol :

- paramètres mécaniques qui peuvent être déterminés par l'essai triaxial de compression, comme le module d'Young « E », le coefficient de poisson « ν » et la pente de la ligne d'état critique « M » qui peut être calculée par l'angle de frottement ;
- paramètres de consolidation qui peuvent être déterminés par l'essai oedométrique de consolidation, comme la pression de préconsolidation « p'_{c0} » et l'indice de compressibilité « $\beta^* = (\lambda - \kappa) / (1 + e_0)$ », où « λ » est l'indice de compression, « κ » est l'indice de gonflement, « e_0 » et l'indice des vides en place ;
- paramètres visqueux qui peuvent être déterminés par un essai à vitesse de déformation imposée, un essai de fluage ou un essai de relaxation : le facteur de viscosité « N » et le coefficient de viscosité « μ ».

Dans cette étude, une attention spéciale est donnée sur l'influence des paramètres visqueux. Des essais triaxiaux non drainés en compression à vitesse de déformation constante variant de 0,1 à 10 %/h sont réalisés en utilisant les valeurs des paramètres de l'argile de Saint-Herblain dans le Tableau 1. A partir des résultats numériques présentés sur la Figure 3, on peut conclure que :

- La contrainte déviatorique maximale « q_{max} » diminue lorsque la valeur de « N » augmente. Mais cet effet devient moins prononcé pour des valeurs de $N > 30$. Une valeur petite de « N » représente une viscosité forte.
- q_{max} augmente lorsque la valeur de « μ » diminue. Pour des valeurs de $\mu > 10^{-5}$, q_{max} atteint une valeur minimale. Pour des valeurs plus petites, une relation quasiment linéaire entre q_{max} et $\log(\mu)$ est établie. Une valeur petite de « μ » représente une viscosité forte.
- La relation entre q_{max} et la vitesse de déformation en logarithme est quasiment linéaire. Elle est influencée par N et « μ » : la pente dépend plutôt de « N », ce qui permet de déterminer, dans un premier temps, la valeur de « N » selon la pente de la courbe de q_{max} en fonction de la

vitesse de déformation, ensuite la valeur de « μ » peut être calibrée à partir de la grandeur de q_{max} .

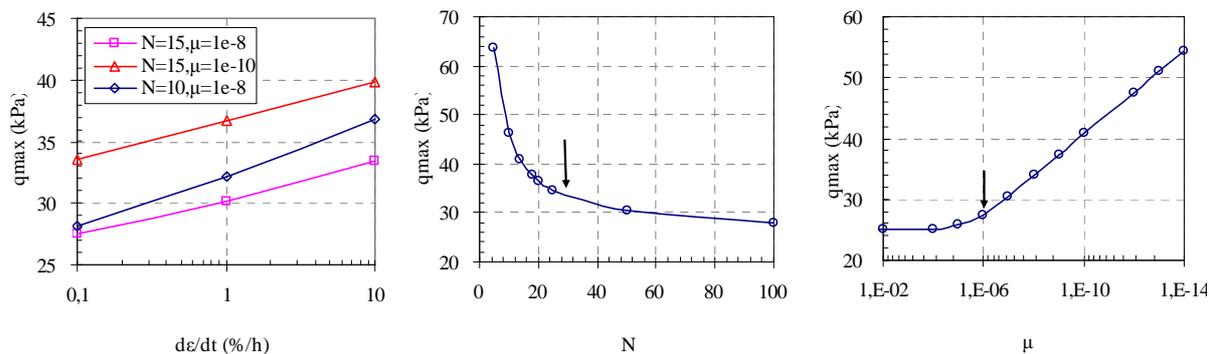


Figure 3. Effet des paramètres visqueux sur l'essai à vitesse de déformation.

3. VERIFICATION EXPERIMENTALE DU MODELE EVP-MCC

3.1. METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES

L'objectif de cette partie est de trouver une méthodologie d'identification des paramètres du modèle et de vérifier la capacité du modèle EVP-MCC à reproduire avec suffisamment de précision un ensemble d'essais représentant différents chemins de sollicitation. On donne d'abord le Tableau 1 qui résume les jeux de paramètres retenus pour chacun des matériaux étudiés. La valeur de la perméabilité est déterminée par la simulation d'essais présentant une phase de consolidation ou de consolidation partielle.

Site	E (kPa)	ν	M	β ($=\lambda-\kappa$)	e_0	P'_{c0} (kPa)	N	μ (1/s.kPa)	k (m/s)
Haney	35 000	0,3	0,85	0,27	2,00	515	12,5	$3,3 \times 10^{-9}$	-
St-Herblain	3 500	0,3	1,25	0,51	2,10	30(32)	10	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-12}$
Flumet	4 000	0,3	1,50	0,15	1,28	70	10	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-9}$
Batiscan	5 000	0,3	1,00	1,59	1,10	70	12	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$
Sackville	4000	0,3	1,68	0,22	1,14	44	8	$6,0 \times 10^{-10}$	-

Tableau 1. Valeur des paramètres du modèle EVP-MCC et de perméabilité.

La procédure retenue pour l'identification des paramètres du modèle est la suivante :

- Une phase d'étude de sensibilité des paramètres du modèle doit être réalisée.
- Le module d'Young « E » peut être calibré par la simulation de la partie initiale de la courbe « contrainte - déformation ».
- Le coefficient de poisson « ν », difficile à déterminer expérimentalement, est souvent fixé à une valeur « 0,3 » dans la littérature.
- La pente de la ligne d'état critique « M » peut être calculée à partir de la donnée de plusieurs points représentant la résistance ultime du sol lors d'essais triaxiaux.

- Les paramètres « λ , κ et e_0 » peuvent être déterminés par l'essai oedométrique de consolidation par paliers et/ou à vitesse de déformation verticale constante.
- La pression de préconsolidation « p'_{c0} » est estimée entre la pression de consolidation initiale et la pression de préconsolidation déterminée par un essai oedométrique.
- Les paramètres visqueux « N et μ » doivent être déterminés par calage à partir de la simulation d'essais à vitesse de déformation constante, de fluage et/ou de relaxation.

On adopte une méthode axisymétrique pour modéliser l'essai triaxial, oedométrique et de pressio-triax. Le maillage est construit en éléments quadrilatères à 8 noeuds.

3.2. SIMULATION DES ESSAIS OEDOMETRIQUES

Des essais oedométriques à vitesse de déformation verticale constante variant de $1,7 \times 10^{-8}$ à $4,0 \times 10^{-5}$ /s ont été réalisés par Leroueil et al. (1985) sur l'argile de Batiscan au Canada. Les éprouvettes ont un diamètre de 50,8 mm et une épaisseur de 19 mm avec une condition de drainage sur la face supérieure. La pression verticale appliquée initiale est de 65 kPa représentant la contrainte in-situ avant l'essai à vitesse de déformation imposée. Des essais oedométriques à long terme ont été réalisés pour. Six niveaux de contrainte verticale sont appliqués (78, 90, 98, 109, 121 et 139 kPa) pendant 70 jours. Les paramètres sont déterminés et présentés dans le Tableau 1. La Figure 4 montre que le modèle EVP-MCC peut bien décrire l'effet de la vitesse de chargement sur la pression de préconsolidation, les deux phases de consolidation primaire et secondaire sous une contrainte verticale constante, ainsi que l'effet de la pression verticale appliquée sur le coefficient de fluage, bien que cet effet apparaisse moins marqué pour les plus forte contraintes appliquées. Cette forte décroissance n'est pas généralement observée et peut s'expliquer peut-être par une diminution sensible du coefficient de compression « C_c », comme on peut l'observer sur la courbe de consolidation.

3.3. SIMULATION DES ESSAIS TRIAXIAUX

Des essais triaxiaux non-drainés à vitesse de déformation constante ont été réalisés par Vaid et al. (1977) sur l'argile de Haney au Canada. La consolidation initiale d'échantillon a été effectuée sous une pression de confinement effective de 515 kPa pendant 36 heures, ensuite en condition non-drainée pendant 12 heures avant l'essai de compression. La vitesse de déformation axiale appliquée varie de $9,4 \times 10^{-4}$ à 11 %/min. Les valeurs des paramètres sont présentées dans le Tableau 1. La comparaison entre les résultats expérimentaux et calculés, présentée sur la Figure 5(a), montre une bonne adaptation de ce modèle pour ce type d'argile, ainsi que sa capacité à décrire l'effet de la vitesse de déformation.

Des essais triaxiaux drainés de relaxation ont été réalisés par Fodil et al. (1997) sur l'argile de Flumet en France. L'éprouvette prélevée à une profondeur de 9 mètres a été consolidée sous une pression isotrope de 70 kPa avant d'appliquer une vitesse de déformation axiale constante de 0,15 %/h. Trois phases de relaxation ont été effectuées à partir d'une déformation atteinte à 1, 3,5 et 6,7 % sur la même éprouvette. Les paramètres du modèle Cam-Clay Modifié présentés dans le Tableau 1 sont déterminés à partir d'essais triaxiaux et d'un essai oedométrique. La Figure 5(b) montre que le modèle EVP-MCC a la capacité à reproduire correctement le comportement visqueux au cours d'une phase de relaxation des contraintes.

Des essais triaxiaux non-drainés de fluage ont été réalisés par Hinchberger (1996) sur l'argile de Sackville au Canada sous une contrainte déviatorique variant de 35 à 50 kPa après la consolidation anisotrope initiale. En plus, un essai à vitesse de déformation constante de 0,009 à 1,14 %/min a été

réalisé sur une éprouvette dans les mêmes conditions initiales. Les paramètres du modèle sont présentés dans le Tableau 1. La Figure 6 montre une bonne concordance entre l'essai et la prédiction du modèle.

3.4. ESSAI PRESSIO-TRIAIX

Des essais de pressio-triax à vitesse de déformation constante variant de 6×10^{-6} à $1,5 \times 10^{-4}$ /s ont été réalisés par Rangeard (2002) sur l'argile de Saint-Herblain en France après une phase de consolidation anisotrope. L'essai Pre3A a été réalisé à une vitesse de 3×10^{-5} /s combiné à deux phases de relaxation à partir d'une déformation atteinte de 1,42 et 3,52 %. Rangeard a aussi réalisé un essai de fluage (Pre1A) suivant une compression à vitesse de déformation de 3×10^{-5} /s. Les valeurs des paramètres sont déterminées par les essais triaxiaux et les essais oedométriques ainsi que la simulation des essais de pressio-triax. La pression de préconsolidation pour Pre1A est plus grande que celle correspondant aux autres essais à cause d'une profondeur plus grande de l'éprouvette. La Figure 7 montre que la prédiction du modèle s'ajuste très bien aux résultats expérimentaux.

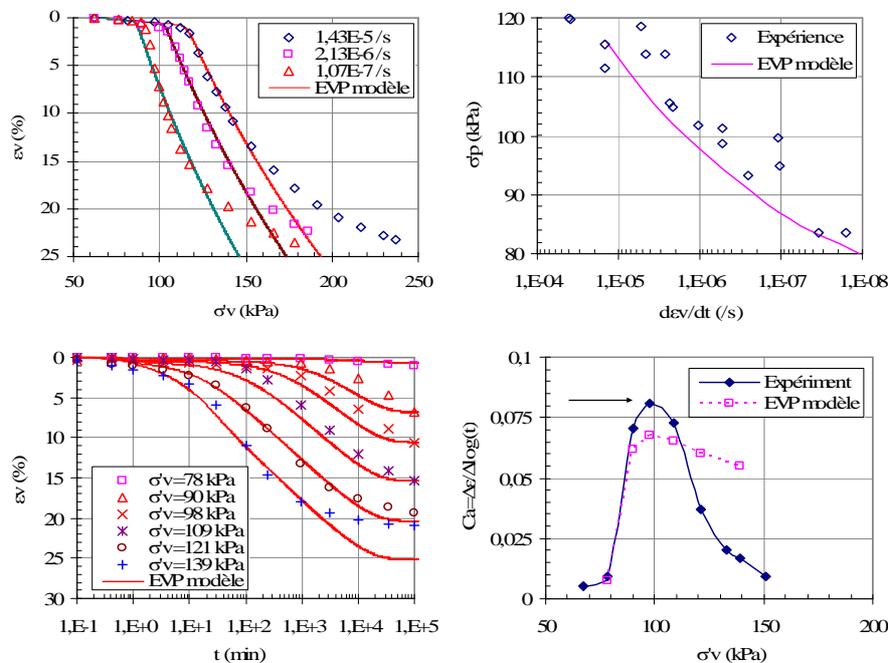


Figure 4. Comparaison des résultats expérimentaux et du calcul pour l'essai oedométrique à vitesse de déformation constante et à long terme sur l'argile de Batiscan.

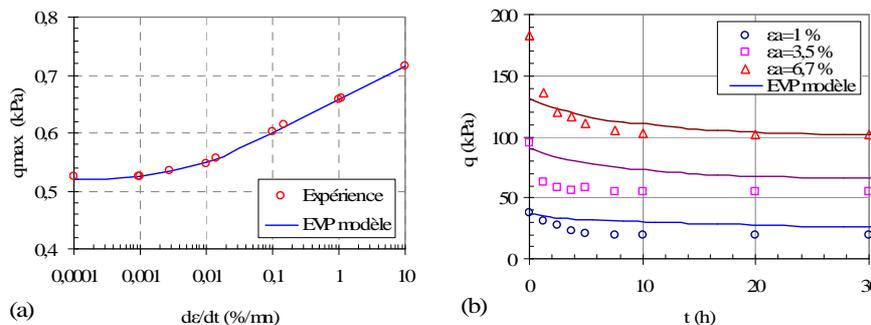


Figure 5. Comparaison des résultats expérimentaux et du calcul pour l'essai triaxial à vitesse de déformation constante sur l'argile de Haney et de relaxation sur l'argile de Flumet.

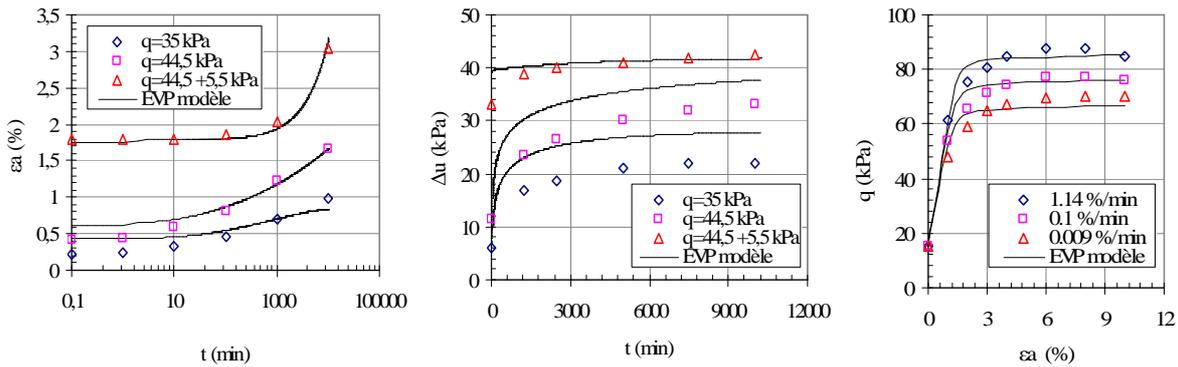


Figure 6. Comparaison des résultats expérimentaux et du calcul pour l'essai triaxial de fluage et à vitesse de déformation constante sur l'argile de Sackville.

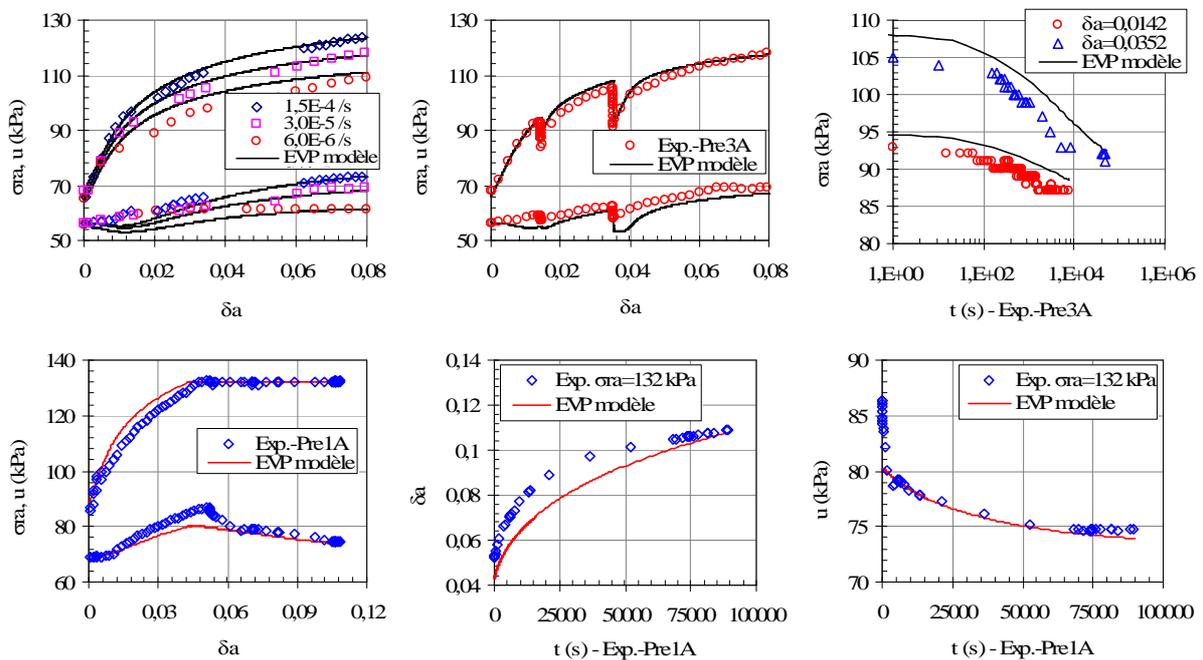


Figure 7. Comparaison des résultats expérimentaux et du calcul pour l'essai pressio-triax à vitesse de déformation constante, de relaxation et de fluage sur l'argile de Saint-Herblain.

4. CONCLUSIONS

Un modèle elasto-viscoplastique construit pour décrire le comportement visqueux de l'argile normalement consolidée a été présenté dans cette étude. Les équations constitutives sont basées sur la théorie de la surcontrainte et le modèle élastoplastique de Cam-Clay Modifié. La fonction de multiplicateur viscoplastique de forme exponentielle a été adoptée pour agrandir le domaine d'application de ce modèle.

Le modèle EVP-MCC a sept paramètres, 5 décrivant le comportement élastoplastique, qui peuvent être déterminés directement à partir des essais en laboratoire tels que les essais triaxiaux et les essais oedométriques, 2 décrivant le comportement visqueux, qui peuvent être déterminés par la simulation d'essai présentant une phase d'évolution en fonction du temps.

Le modèle EVP-MCC a été employé pour la simulation d'essais réalisés sur différentes argiles. Il permet de décrire correctement l'effet de la vitesse de déformation sur la pression de préconsolidation définie à partir de l'essai oedométrique. Il permet de décrire l'effet de la contrainte verticale sur le coefficient de fluage « C_{ae} ». Il permet de décrire aussi l'effet de la vitesse de déformation sur l'évolution de la contrainte déviatorique maximale « q_{max} ». Le modèle peut aussi décrire le tassement à long terme lors d'essais oedométriques de fluage.

En conclusion, ce modèle, choisi volontairement simple, permet donc une bonne approche quantitative du comportement dépendant du temps des matériaux argileux sur des chemins simples axisymétrique et en chargement monotone.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Adachi, T. & Oka, F. (1982). Constitutive equations for normally consolidated clay based on elastoviscoplasticity. *Soils and Foundations*, 22(4), Dec, p57-70.
- Fodil, A., Aloulou, W. & Hicher, P.Y. (1997). Viscoplastic behaviour of soft clay. *Geotechnique*, 47(3), Aug, p 581-591.
- Hinchberger S. D. (1996). The behaviour of reinforced and unreinforced embankments on rate sensitive clayey foundations. Thesis at University of Western Ontario, Canada.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. & Bouchard, R. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Geotechnique*, v 35, n 2, Jun, 1985, p 159-180.
- Lo, K. Y., Bozozuk, M. & Law, K. T. (1976). Settlement analysis of the Gloucester test fill. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(4), Nov, p 339-354.
- Oka, F., Adachi, T. & Okano, Y. (1986). Two-dimensional consolidation analysis using an elastoviscoplastic constitutive equation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10(1), Jan-Feb, p 1-16.
- Perzyna P. (1966). Fundamental problems in viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, volume 9, pp. 243-377 Academic Press.
- Rangeard D. (2002). Identification des caractéristiques hydro-mécaniques d'une argile par analyse inverse des essais pressiométriques. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- Roscoe, K.H. & Burland, J.B. (1968). On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clay. *Engineering Plasticity*, p 535-609.
- Vaid, Y.P. & Campanella, R.G. (1977). Time-dependent behavior of undisturbed clay. *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(7), Jul, p 693-709.
- Zienkiewicz, O.C. & Taylor, R.L. (1989). The finite element method. 4th ed. McGraw-Hill, London.
- Zhang D. (2003). Analysis of time-dependent behavior of soft clay and its application on the prediction of long-term settlements of tunnels. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Tongji (in chinese).