

Détermination des paramètres d'un modèle hyperbolique et simulation numérique du comportement du matériau analogique de Schneebeli

Determination of parameters for a hyperbolic model and numerical simulation of behavior of an analog Schneebeli material

Djamila Rizi^{1*}, Etienne Flavigny² & Mohamed Meksaouine³

¹Laboratoire Génie Civil (LGC), Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

²Laboratoire Sols, Solides et Structures, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

³Laboratoire Sols et Hydraulique, Département d'Hydraulique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Info. Article

Historique de l'article

Reçu le 02/10/2017

Révisé le 17/01/2019

Accepté le 20/01/2019

Mots-clés:

Modélisation, Plaxis, Essai triaxial, Modèle hyperbolique, Matériau analogique

Key words

Modeling, Plaxis, Triaxial test, Hyperbolic model, Analogical material

RESUME

Ce document présente une étude du comportement des sols et des matières granulaires et une caractérisation du matériau analogique de Schneebeli. Une modélisation de l'essai triaxial est réalisée par le logiciel Plaxis 2D Version 8.2 avec l'utilisation d'une loi de comportement hyperbolique HSM (Hardening Soil Model) implémentée dans le code de calcul par éléments finis Plaxis. Ce modèle de sol avec écrouissage qui dérive du modèle hyperbolique de Duncan et Chang avec une amélioration de la formulation hyperbolique en un modèle élasto-plastique propose une synthèse de différents modèles et permet de prendre en compte la non linéarité du sol et particulièrement la dilatance avant rupture. Il fait intervenir trois paramètres de type module élastique et un paramètre de puissance m pour caractériser la dépendance de la raideur avec la contrainte. La transformation de l'équation hyperbolique reliant le déviateur de contrainte et la déformation axiale en une relation linéaire a permis la détermination du module d'élasticité E_i , de la valeur asymptotique de la contrainte déviatorique $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ainsi que du rapport de rupture R_f . La détermination du paramètre de puissance m est également présentée. Les résultats expérimentaux des courbes déviatoriques et volumiques issus d'essais effectués précédemment par N. Dolzhenko avec le matériau analogique de Schneebeli ont été confrontés aux résultats de la simulation numérique de cette étude obtenus par le logiciel Plaxis 2D Version 8.2.

ABSTRACT

This work is a study of soils behavior and granular materials and a characterization of Schneebeli analogical material. A numerical modeling of triaxial test is performed through the software Plaxis 2D Version 8.2, using HSM (hardening soil model) hyperbolic model which is integrated on Plaxis based on the finite elements theory. This hardening soil model, coming from hyperbolic model of Duncan and Chang, with an improvement of hyperbolic formulation into an elasto-plastic model proposes a synthesis of different models and makes it possible to take into account the non linearity of the soil and especially the dilatance before failure. It involves three parameters of the elastic modulus and a power parameter m to characterize the dependence of the stiffness on the stress. The representation of stresses deviator vs axial strains gives rise to a linear variation instead of hyperbolic one, which allow the determination of the elastic modulus E_i , the asymptotic value of stresses deviator $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ and the failure ratio R_f . The determination of the power parameter m is also presented. The experimental results of the deviatoric and volumic curves previously conducted by N. Dolzhenko with Schneebeli analogical material, have been compared with the numerical simulation results of this study.

* Auteur Correspondant:

Djamila Rizi

Département de Génie Civil,
Université Badji Mokhtar, BP 12,
Annaba, 23000, Algérie.

Email: rizidjamila@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Il a été démontré par de précédentes études que même lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations extrêmement faibles, de nombreux sols et de matières granulaires présentent un comportement contraintes-déformations réversible non linéaire.

Le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb avec un module d'élasticité constant est inadapté pour décrire le comportement des milieux granulaires car les valeurs du module doivent varier avec le déviateur de contrainte appliqué et avec la contrainte latérale.

Le modèle élastique de type hyperbolique de Duncan et Chang [1] permet une meilleure adaptation car le module d'élasticité varie avec la déformation. D'autre part, l'hyperbole permet une entrée progressive en plasticité et donne un meilleur accord avec la mesure des déplacements. Le modèle hyperbolique élastique non linéaire a été proposé par Kondner [2] et Kondner Zelasko pour modéliser le mieux possible le comportement non linéaire du sol avant rupture puis développé par Duncan et Chang [1]. Kondner [2] a établi à partir d'essais triaxiaux une relation hyperbolique entre le déviateur de contrainte et la déformation axiale. La relation hyperbolique contrainte-déformation a été développée pour l'analyse incrémentale non linéaire des déformations du sol et repose sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

Le modèle de sol avec écrouissage ou modèle HSM intégré dans le logiciel de calcul Plaxis dérive du modèle hyperbolique de Duncan et Chang [1] avec modification ou amélioration de la formulation hyperbolique en un modèle élasto-plastique [3]. Il peut être adapté à tous les types de sol, y compris les sols mous et les sols durs [4,5]. Ce modèle est basé sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb, il a été développé par la théorie de plasticité et il inclue la dilatance du sol [6]. C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité, avec écrouissage en cisaillement ou en compression. Il propose une synthèse de différents modèles tels que le modèle de Duncan et Chang et le modèle de Cam-Clay [7]. Il permet de prendre en compte certains principes fondamentaux du comportement des sols telles que la variation du module avec la contrainte et la dilatance avant la rupture alors qu'un modèle élastique parfaitement plastique ne peut prendre en compte la dilatance qu'une fois la rupture atteinte. Ce modèle permet également de prendre en considération des modules différents en chargement et en déchargement et la dépendance de la rigidité avec la contrainte selon une fonction de puissance [7,8].

L'analyse du comportement mécanique d'un milieu granulaire peut être effectuée à l'aide d'un massif de rouleaux présentant au moins deux diamètres différents appelé matériau analogique. Schneebeli montra en 1956 qu'un empilement de rouleaux à diamètres distincts est représentatif d'un matériau pulvérulent et ramena ainsi l'étude des problèmes en mécanique des sols avec un matériau pulvérulent à deux dimensions [9,10]. Le massif était constitué de rouleaux de 2, 3 et 4 mm de diamètre et de 60 mm de longueur. L'utilisation d'un matériau analogique dont le comportement est analogue à celui d'un matériau granulaire permet d'éliminer totalement les effets de bord et de faces latérales qui sont inévitables dans le cas des modèles utilisant un sol réel car il s'agit d'un empilement de rouleaux auto-stable ne nécessitant pas de support facial. Le matériau analogique présente également l'avantage de la facilité de la mise en œuvre et la répétitivité des essais ainsi que la possibilité d'aller jusqu'à la rupture. Différents auteurs ont mené des études pour la caractérisation des matériaux analogiques qui peuvent être constitués de rouleaux en dural utilisés par Schneebeli en 1956, en caoutchouc par Oda, en PVC par Tratapel, Gourves et Mezghani ou en acier par Kastner, Masrouri et Dolzhenko [9]. Ils ont montré par des essais biaxiaux que l'angle de frottement interne ne dépend que de l'état de surface des rouleaux et qu'il est nécessaire de mélanger des rouleaux d'au moins deux diamètres différents pour obtenir un massif de sol au comportement isotrope. Faugeras a utilisé une méthode fondée sur l'étude du frottement longitudinal des rouleaux pour mesurer les contraintes au sein du massif. Il a montré le phénomène de dilatance et a affirmé le caractère aléatoire de la contrainte au sein d'un milieu granulaire [9]. Evesque et Biarez ont effectué des essais triaxiaux réalisés sur les rouleaux de Schneebeli constitués de cylindres de duralumin de 6 cm de longueur et de diamètres différents. Ils ont montré que le mélange de rouleaux de deux diamètres provoque des fluctuations plus importantes que celles constatées dans un sol naturel et que l'utilisation d'un minimum de trois diamètres ou plus est nécessaire pour réaliser un bon sol analogique [9].

Kastner, pour la simulation des excavations profondes en site urbain a effectué des essais pour caractériser le même matériau analogique que celui de notre étude. Il a utilisé une cellule triaxiale de grande dimensions avec de fortes contraintes de confinement allant jusqu'à 500 kPa. Les courbes de déformations volumiques qui en résultent, présentent un comportement globalement dilatant. L'angle de frottement interne obtenu était de 21° , le coefficient de Poisson de 0,9 et le poids volumique moyen de l'ordre de 65 KN/m^3 [9].

Al Abram, pour l'étude du champ de déplacement induit par le creusement d'un tunnel, a effectué une identification des paramètres du modèle de Mohr-coulomb à partir des courbes expérimentales de Kastner réalisées avec des contraintes de confinement de 200 et 500 KPa. Des jeux de paramètres ont été déterminés avec un coefficient de poisson de 0,48 puis de 0,35. La comparaison entre la simulation numérique d'Al Abram et les expérimentations de Kastner a montré que le coefficient de Poisson n'a que peu d'influence sur la courbe du déviateur alors qu'il a une grande influence sur la contractance et qu'un coefficient de Poisson de 0,48 et un angle de dilataance de 4° permettent de simuler de manière satisfaisante les déformations volumiques expérimentales.

Dolzhenko [9] a également caractérisé le même matériau analogique pour l'étude de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel, par des essais biaxiaux et œdométriques avec un échantillon 220 mm de hauteur par 200 mm de largeur sollicité à des contraintes latérales de 20, 30, 40 et 50 KPa appliquées par pression d'air injecté dans une membrane en caoutchouc. Un déplacement vertical a été appliqué au niveau du plateau supérieur. Les courbes déviatoriques obtenues ont présenté un palier et un écoulement plastique atteint sans passer par un pic. L'angle de frottement interne était de 24° [9].

Cette étude présente une modélisation de l'essai triaxial avec la loi hyperbolique HSM contenue dans Plaxis 2D Version 8.2. Le sol utilisé est le matériau analogique de Schneebeli constitué d'un empilement de rouleaux cylindriques en acier de 6 cm de longueur et de 3, 4 et 5 mm de diamètre avec une équirépartition en masse pour représenter un sol pulvérulent. Les résultats numériques seront comparés aux résultats expérimentaux de Dolzhenko [9].

2. MODELES HYPERBOLIQUES:

2.1 Modèle hyperbolique élastique non linéaire de Kondner

La relation hyperbolique entre le déviateur de contraintes $(\sigma_1 - \sigma_3)$ et la déformation axiale ε_1 proposée par Kondner pour décrire le comportement des sols est exprimée par l'équation [2]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (1)$$

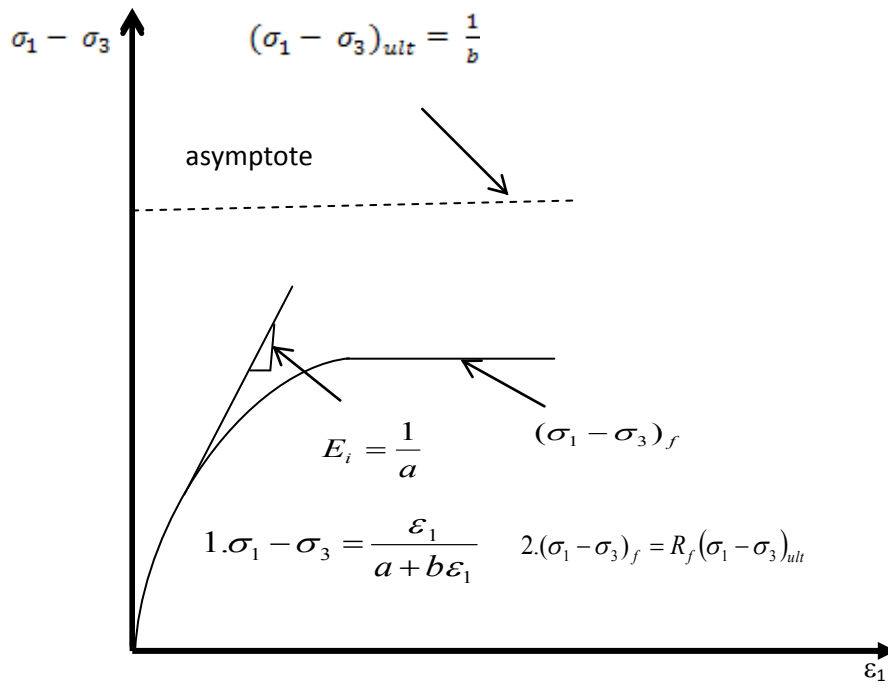
σ_1 et σ_3 sont les contraintes principales extrêmes, ε_1 est la déformation axiale, E_i est le module de Young tangent initial et $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ est la valeur asymptotique de la contrainte déviatorique.

Les valeurs de E_i et $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ peuvent être déterminées après transformation de l'équation hyperbolique (1) en une relation linéaire entre $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ et ε_1 représentée sur la figure 1 et de la forme :

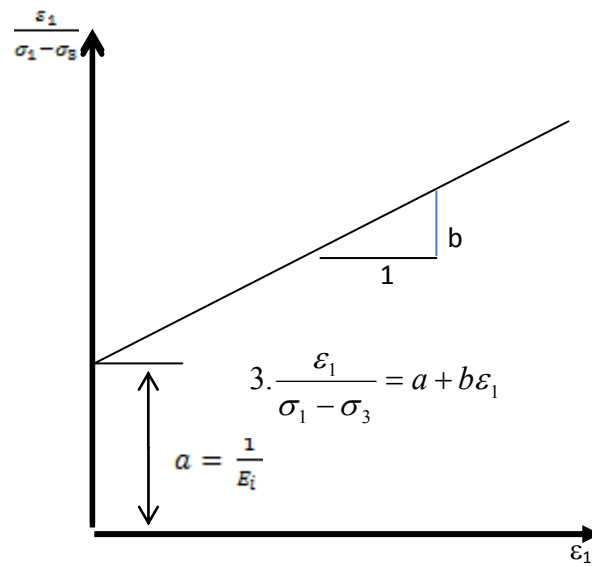
$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b \varepsilon_1 \quad (2)$$

L'équation transformée est la suivante:

$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (3)$$



a-Coubre réelle



b- Courbe transformée

Figure 1 : Représentation du modèle hyperbolique d'après Kondner [2]

Le module de Young E_i et la valeur asymptotique de la contrainte déviatorique $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ auront pour expressions:

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (4)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{1}{b} \quad (5)$$

Les valeurs de $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ et de $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ qui représente le déviateur de contrainte à la rupture sont liées par le rapport constant de rupture R_f tel que :

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6)$$

R_f est compris entre 0.6 et 0.9.

La variation du module de Young tangent initial E_i avec la contrainte latérale σ_3 est représentée par l'équation de la forme suivante qui a été proposée par Janbu [11] :

$$E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (7)$$

Le module de Young tangent E_t pour la phase de chargement a pour expression [12]:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 E_i \quad (8)$$

Le module de Young E_{ur} pour la phase de déchargement-rechargement a pour expression [13]:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (9)$$

Le module de compressibilité volumique tangent K_t est tel que [13,14]:

$$k_t = k_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (10)$$

C est la cohésion, φ est l'angle de frottement interne, P_a est une pression de référence, K , k_b , K_{ur} , n et m sont des paramètres expérimentaux.

2.2 Modèle HSM (Hardening Soil Model)

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique intégré dans le logiciel Plaxis. Une représentation du modèle HSM est donnée par la figure 2.

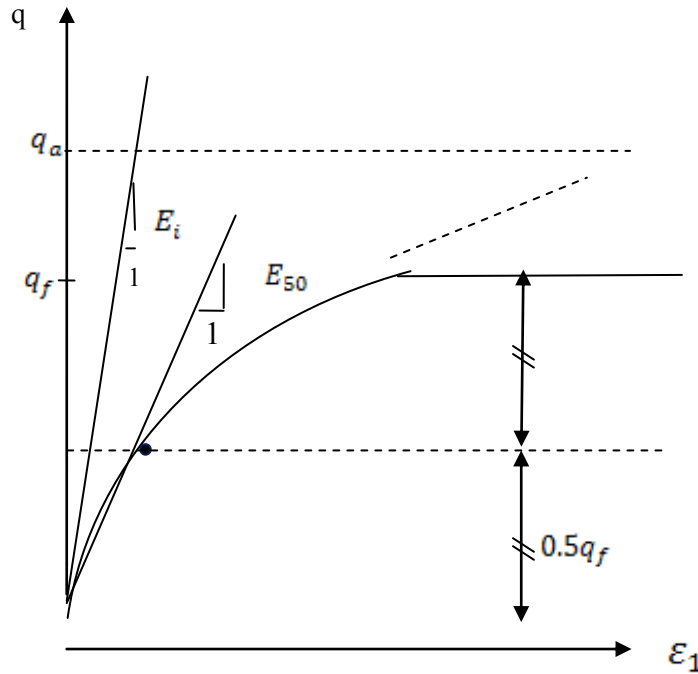


Figure 2 : Relation σ - ϵ pour un essai triaxial du modèle HSM [15]

D'après le modèle HSM, la relation hyperbolique pour un essai triaxial drainé entre la déformation axiale et le déviateur de contraintes peut être approximée par l'expression suivante [16, 17, 18] :

$$\epsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{q}{q_a - q} \text{ pour } q < q_f \quad (11)$$

$q_a = \frac{q_f}{R_f}$ est la valeur asymptotique du déviateur, ϵ_1 est la déformation axiale, q est le déviateur de contrainte, R_f est le rapport de rupture et q_f est la déviateur de contrainte ultime défini par [16, 17, 18] :

$$q_f = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} (\sigma_3 + c \cot \varphi) \quad (12)$$

E_{50} représente le module d'élasticité tangent au premier chargement, dépend de la contrainte de confinement, il est donné par l'expression [3] :

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (13)$$

E_{50}^{ref} est le module d'élasticité de référence correspondant à la pression de référence p^{ref} .

m est la puissance, c 'est un paramètre variant de 0.5 à 1 [15].

Le module d'élasticité pour le déchargement et rechargement est calculé par l'équation [3] :

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi - p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (14)$$

E_{ur}^{ref} est le module d'élasticité de référence pour le déchargement et rechargement, correspondant à la pression de référence P^{ref} .

Le module d'élasticité œdométrique est exprimé par l'équation [4]:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi - p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (15)$$

E_{oed}^{ref} est le module tangent œdométrique correspondant à p^{ref} .

3. RESULTATS

3.1 Détermination des paramètres de la loi HSM

Détermination du rapport de rupture R_f

Les coefficients a et b de l'équation (2) et donc le module d'élasticité E_i et la valeur asymptotique de la contrainte déviatorique $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ sont déterminés à partir de la transformée de la courbe hyperbolique représentée par la figure 3 et calculés avec les équations (4) et (5).

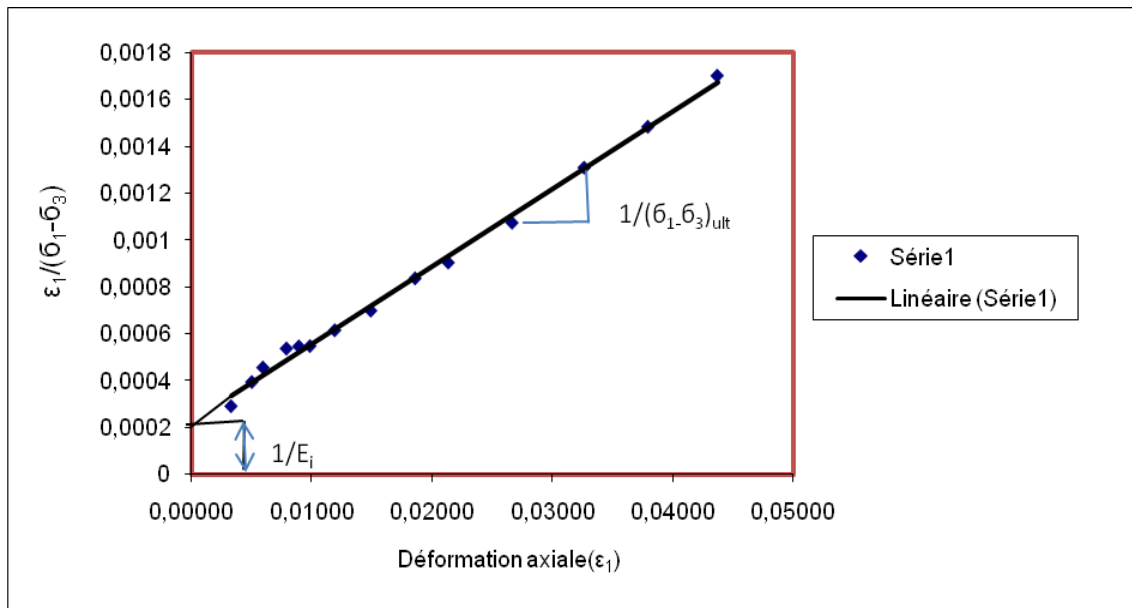


Figure3: Représentation de la transformée de l'hyperbole et détermination des coefficients a et b

Le rapport de rupture R_f est calculé par l'équation (6) et a pour valeur 0.9. La pression de référence est celle qui correspond à $\sigma_3 = 20\text{KPa}$.

Détermination du paramètre de puissance m

L'équation (13) appliquée dans le cas d'un matériau sans cohésion (c=0) donne l'expression suivante :

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_3^{ref}} \right)^m \quad (16)$$

Le paramètre m est déterminé à partir de la figure 4 après la transformation de l'équation (16) en logarithme donnant l'expression suivante :

$$\text{Log } E_{50} = \text{Log } E_{50}^{ref} + m \text{Log} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_3^{ref}} \right) \quad (17)$$

Log E₅₀

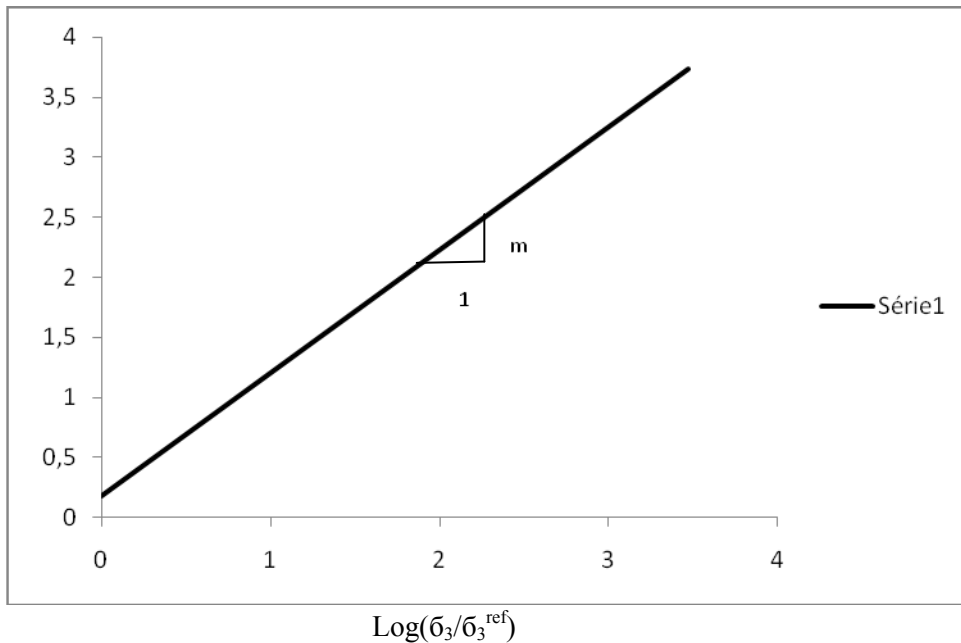


Figure 4 : Détermination du paramètre de puissance m

Détermination de l'angle de frottement interne, de l'angle de dilatance et de la cohésion

Les valeurs de l'angle de frottement interne φ et de la cohésion C ont été déterminées par N.Dolzhenko[9] dont les résultats expérimentaux seront comparés aux résultats numériques de notre étude. Les paramètres C et φ se déterminent à l'aide des contraintes à la rupture obtenues par au moins deux essais et par la droite représentant $s = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ en fonction de $t = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ dont l'ordonnée à l'origine représente la cohésion C et ayant pour pente $\sin \phi$. Dans notre cas, la cohésion est nulle mais pour des raisons numériques exigées par le logiciel Plaxis, on prend C=0.1 KPa. L'équation de la droite est donc: $s = \sin(22^\circ) t$, d'où l'angle de frottement interne φ = 22°.

L'angle de dilatance ψ a également été déterminé par N. Dolzhenko [9] à partir de la courbe de déformation volumique par la relation suivante liant l'angle de dilatance ψ et la pente des déformations volumiques:

$$\Delta \epsilon_v / \Delta \epsilon_1 = - 2 \sin \psi / (1 - \sin \psi) \quad (18)$$

L'angle de dilatance obtenu est ψ = 8°.

Détermination du module d'élasticité de référence et du module d'élasticité pour le déchargement et rechargement

La pression de référence est celle qui correspond à $\sigma_3 = 20\text{KPa}$, d'où $P^{\text{ref}} = 20\text{KPa}$.

Le module d'élasticité de référence E_{50}^{ref} correspond à 50% de la contrainte de rupture, il est déterminé à partir de la courbe expérimentale correspondant à la pression de référence $\sigma_3 = 20\text{KPa}$.

La valeur du module de déchargement–rechargement E_{ur}^{ref} vaut trois fois celle du module d'élasticité E_{50}^{ref} [4, 7, 19], d'où $E_{ur}^{\text{ref}} = 3 E_{50}^{\text{ref}}$.

Le coefficient des terres au repos est selon la formule de Jacky : $K_0 = 1 - \sin \varphi$.

Les paramètres de la loi HSM obtenus et utilisés pour la modélisation de l'essai triaxial sont donnés dans le tableau 1.

Tableau1 : Paramètres de la loi HSM

Paramètre	Description	Valeur du paramètre	Unité
C	Cohésion	0.1	KPa
φ	Angle de frottement interne	22	°
Ψ	Angle de dilatance	8	°
K_0	Coefficient des terres au repos	0.625	-
ν	Coefficient de poisson	0.45	-
P^{ref}	Pression de référence	20	KPa
E_{50}^{ref}	Module d'élasticité de référence	2976	KPa
R_f	Rapport de rupture	0.9	-
m	Paramètre puissance	1	-
E_{ur}^{ref}	Module d'élasticité pour le déchargement et rechargement	8928	KPa

3.2 Modélisation de l'essai triaxial

La modélisation numérique de l'essai triaxial a été effectuée à l'aide du code de calcul en éléments finis Plaxis 2 D Version 8.2 avec un modèle axisymétrique. L'échantillon du matériau analogue de Schneebeli est d'une hauteur de $H_0 = 220\text{mm}$, d'une largeur $C = 200\text{mm}$ et d'une épaisseur $e = 6\text{cm}$. Le poids volumique est $\gamma = 65\text{KN/m}^3$. Les conditions de symétrie permettent de modéliser un quart de l'échantillon. Le modèle HSM (Hardening Soil Model) contenu dans Plaxis est utilisé. Concernant les conditions aux limites, les déplacements normaux aux extrémités des axes de

symétrie sont bloqués. Le côté gauche et la partie inférieure sont des axes de symétrie. La simulation du chargement se fait en deux étapes pour chaque contrainte de confinement σ_3 . Les valeurs de la contrainte σ_3 sont de 20, 30, 40 et 50 KPa . A la première phase, un chargement isotrope noté (A) correspondant à la contrainte de confinement σ_3 est appliqué sur la partie supérieure et le côté droit. A la deuxième phase, on applique seulement un chargement vertical noté (B) sur la partie supérieure jusqu'à la rupture alors que le chargement horizontal est maintenu constant. Le modèle de calcul est représenté par la figure 5.

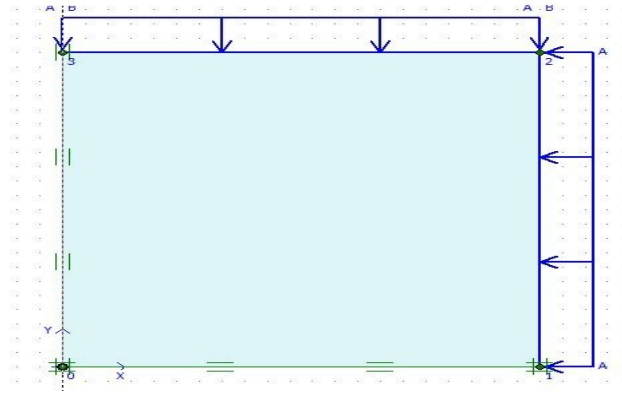


Figure 5 : Modèle de calcul.

La figure 6 représente la génération du maillage pour la modélisation de l'essai triaxial.

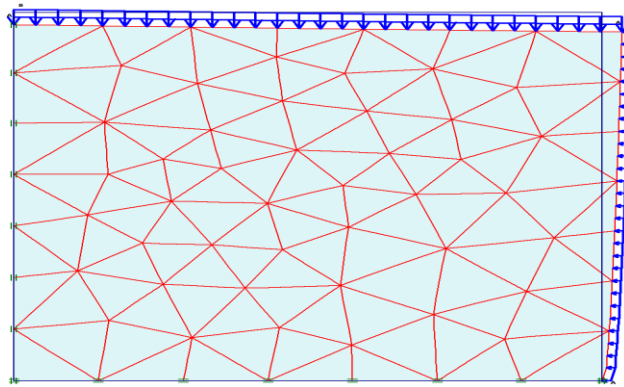


Figure 6 : Génération du maillage

Les résultats de la modélisation numérique de l'essai triaxial seront comparés aux résultats expérimentaux de Dolzhenko [9] représentés sur la figure 7.

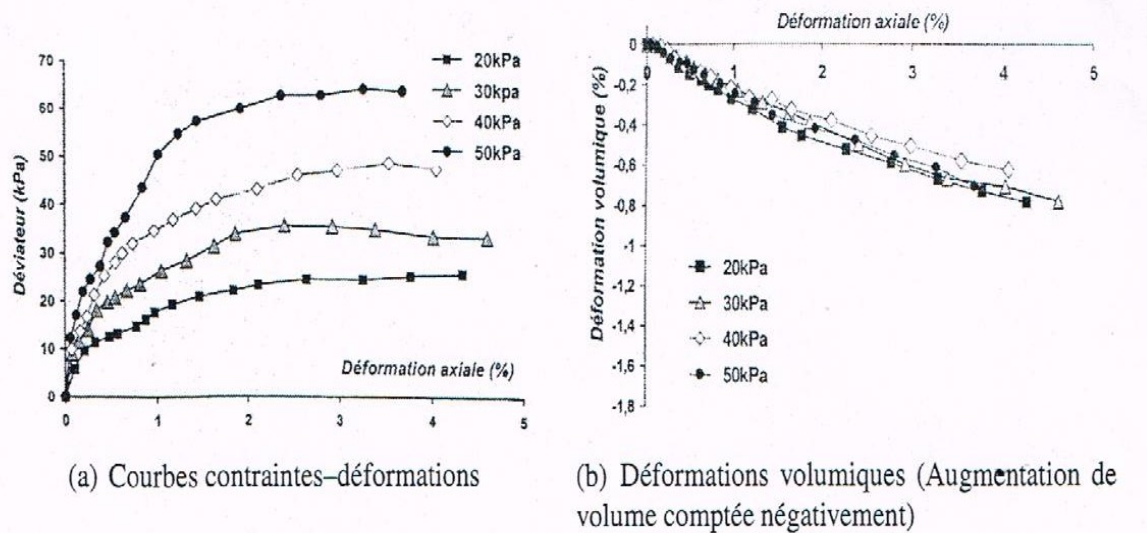


Figure 7 : Résultats expérimentaux de Dolzhenko [9]

3.3 Courbes déviatoriques et volumiques

Les résultats de la modélisation de l'essai triaxial par le logiciel Plaxis 2D Version 8.2 donnant les courbes déviatoriques et les courbes volumiques sont donnés respectivement par les figures 8 et 9.

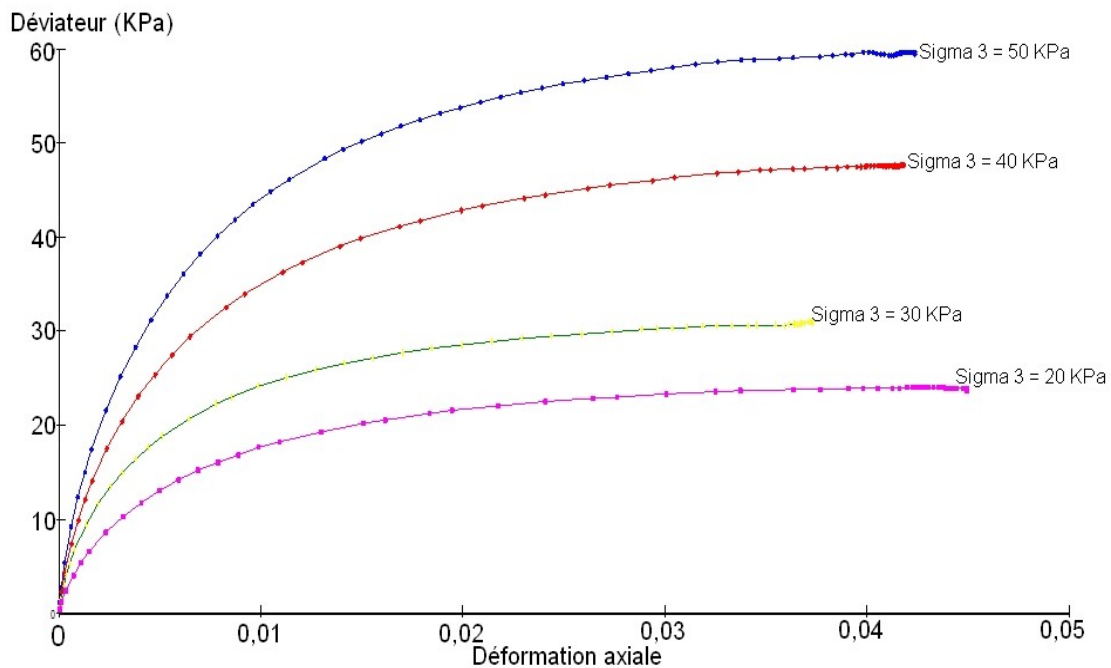


Figure 8 : Courbes déviatoriques de la modélisation de l'essai triaxial

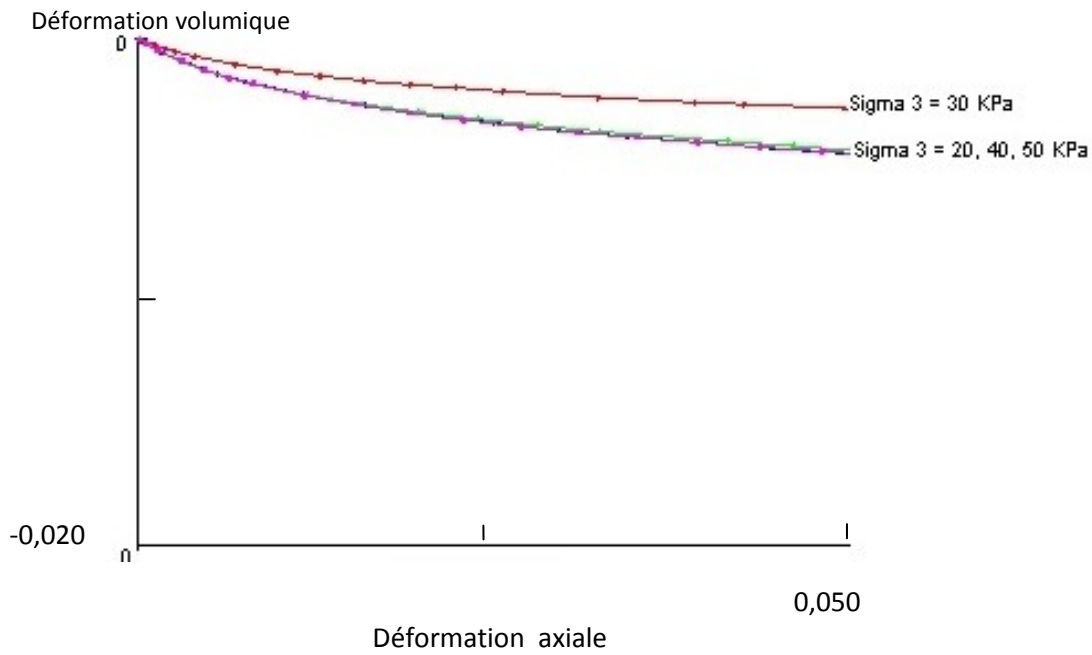


Figure 9 : Courbes volumiques

La confrontation des résultats numériques et des résultats expérimentaux est représentée sur la figure 10.

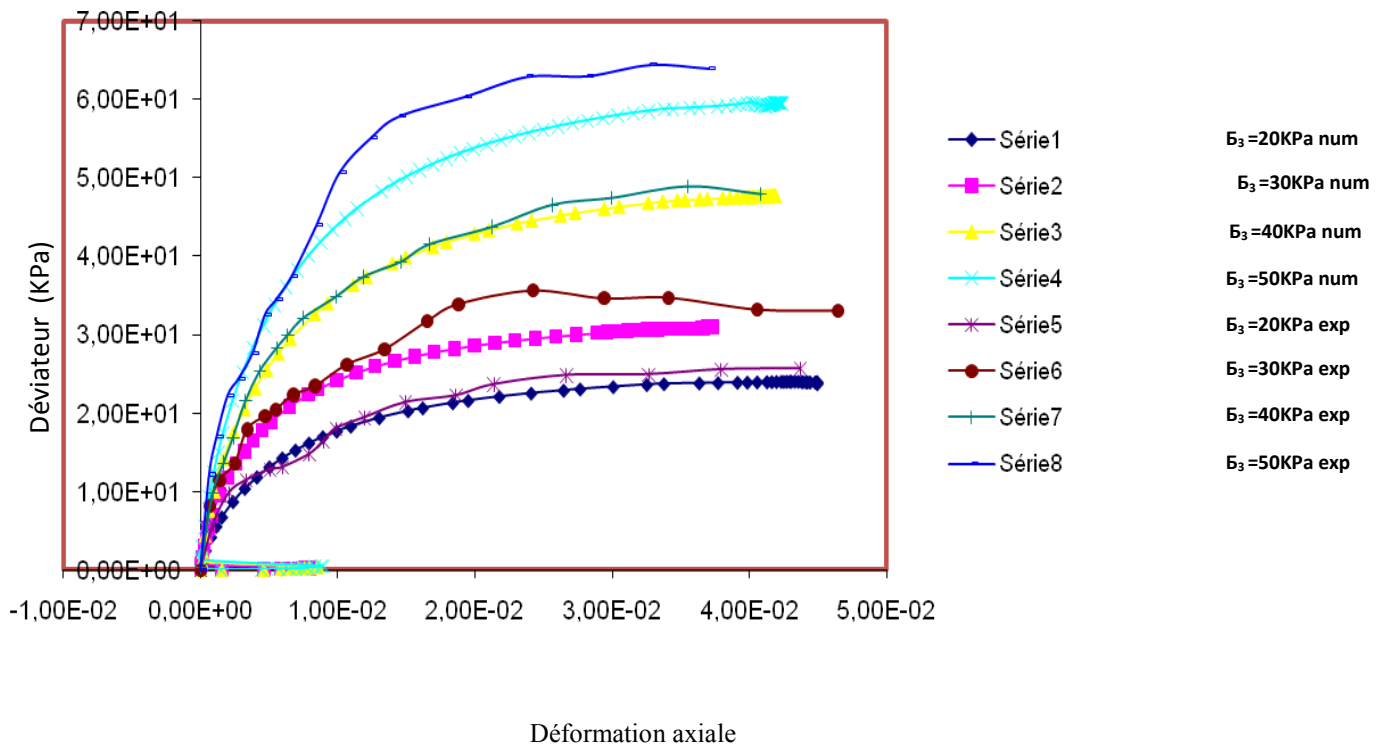


Figure 10 : Confrontation des résultats de la simulation numérique et des essais expérimentaux

Les courbes déviatoriques représentant le déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale de la figure 8, obtenues par le logiciel Plaxis présentent une partie initiale linéaire d'autant plus importante que σ_3 est élevée, suivie d'un changement de pente progressif. Ces courbes

©UBMA - 2019

montrent que le comportement contraintes-déformations du matériau analogique de Schneebeli présente seulement un palier et pas véritablement de pic de contrainte. L'allure de ces courbes ainsi que les valeurs des contraintes ultimes sont semblables à celles des courbes expérimentales de Dolzhenko [9]. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus par Kastner à partir d'essais effectués sous fortes contraintes. Caudron, pour caractériser le matériau analogique de notre étude, a utilisé une plage de confinement variant de 10 à 60 KPa et a également observé un comportement globalement analogue à celui obtenu par notre simulation pour les différents essais sauf pour l'essai à 56 KPa de confinement qui présente une chute importante du déviateur pour les déformations axiales supérieures à 5%. Les courbes volumiques représentant la déformation volumique en fonction de la déformation axiale de la figure 9 obtenues de la simulation numérique pour les contraintes latérales $\sigma_3 = 20, 40$ et 50 KPa sont confondues. Ce chevauchement est également observé sur les courbes expérimentales. Cependant, la courbe volumique correspondant à la contrainte latérale $\sigma_3 = 30$ KPa est distincte des trois autres. Pour les quatre valeurs de la contrainte latérale σ_3 , les courbes numériques montrent une dilatance ou une augmentation de volume dans l'échantillon. Le chargement se décompose en une phase de dilatance qui s'étale dans un domaine de déformation de (0 - 4%) suivie d'une stabilisation des efforts qui représente le domaine d'écoulement plastique à partir d'une déformation axiale de 4%. Ces courbes volumiques ne montrent aucune contractance (diminution de volume). Ce comportement dilatant du matériau analogique de Schneebeli est également observé sur les courbes volumiques expérimentales dans lesquelles le comportement contractant est inexistant. Cependant, on observe sur celles-ci un volume constant en début de chargement dans un domaine très réduit allant jusqu'à une déformation axiale de 0,25%. Au-delà de cette valeur, le phénomène de dilatance se manifeste dans une zone de déformation allant de 0,25% jusqu'à 3,5%. Le domaine d'écoulement plastique apparaît à partir d'une déformation de 3,5%. Les courbes de variation de volume obtenues par Kastner ont également montré que ce sol analogique a un comportement globalement dilatant bien qu'une courte phase initiale de contractance soit observée.

La confrontation des courbes déviatoriques numériques et expérimentales représentée sur la figure 10 conduit à des résultats satisfaisants tant au niveau des contraintes ultimes que des départs de courbes. En effet les courbes numériques sont rapprochées des courbes expérimentales pour les contraintes latérales $\sigma_3 = 20$ KPa, 30 KPa et 40 KPa et s'écartent légèrement pour $\sigma_3 = 50$ KPa. Pour les quatre valeurs de la contrainte latérale σ_3 , les contraintes ultimes obtenues de la simulation numérique sont voisines de celles issues des essais expérimentaux. Les mêmes départs de courbes sont observés, ce qui conduit à des modules d'élasticité approximativement égaux.

4. CONCLUSION

L'identification des paramètres du modèle HSM par l'intermédiaire d'un calage avec des essais expérimentaux et une simulation numérique du comportement du matériau analogique de Schneebeli ont été présentées dans cette étude. La valeur du rapport de rupture R_f déterminée après la transformation de l'équation hyperbolique en relation linéaire ainsi que celle du paramètre de puissance m sont comprises dans le domaine des valeurs acceptées par le logiciel Plaxis. La confrontation des courbes déviatoriques de la simulation numérique du comportement du matériau analogique de Schneebeli par le logiciel Plaxis 2D Version 8.2 avec les courbes expérimentales a montré que les valeurs des contraintes ultimes numériques sont similaires à celles des contraintes ultimes expérimentales et que les mêmes départs de courbes sont observés ce qui conduit à des modules d'élasticité équivalents. Les courbes volumiques numériques sont en cohérence avec les courbes volumiques expérimentales et montrent que le comportement du matériau analogique de Schneebeli est non linéaire et dilatant et que la dilatance commence bien avant la rupture. La concordance entre la modélisation numérique et les essais expérimentaux confirme la pertinence du logiciel Plaxis et permet de considérer la loi HSM intégrée dans Plaxis comme une loi adéquate pour décrire le comportement du sol soumis à l'essai triaxial.

Afin de mieux exploiter ces résultats, cette étude pourrait être complétée par un exemple numérique traitant un problème géotechnique tel qu'un tunnel avec l'utilisation d'un modèle réduit pour l'étude de l'impact du creusement des ouvrages souterrains sur le milieu environnant.

REFERENCES

- [1] J.M. Duncan & C.Y. Chang, 1970. Non linear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 96(5), 1629-1653.
- [2] R. Kondner, 1963. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 89, 115-143.
- [3] P. Pramthawee et al., 2011. Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rock fill dams, *Journal of Science and Technology*, Thailand, 325-334.
- [4] Y. Hejazi et al., 2007. Impact des modèles de comportement sur la modélisation des ouvrages souterrains, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, 1-7.
- [5] R. Girout et al., 2013. Apport des géosynthétiques dans le renforcement par inclusions rigides des sols compressibles, 9^{èmes} Rencontres Géosynthétiques, Dijon, France, 457-466.
- [6] T. Schanz et al., 1999. The hardening soil model : Formulation and verification, Beyond 2000 in computational Geotechnics, ISBN, Rotterdam, Hollande, 1-16.
- [7] N. Gilleron et al., 2016. Utilisation du hardening soil model dans l'étude du creusement de tunnels superficiels, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, France, 1-9.
- [8] F. Cuira et al., 2013. Modélisation numérique du comportement d'une colonne de soil-mixing et confrontation à un essai de chargement en vraie grandeur, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 2461-2465.
- [9] N. Dolzhenko, 2002. Etude expérimentale et numérique de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel. Développement d'une loi de comportement spécifique, thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 300p.
- [10] S.M. Daoud, M. Meghachou & P. Vacher, 2011. Mise en évidence du phénomène « Stick-Slip » lors de la rupture par poussée d'un sol constitué de matériau analogique, XXIX Rencontre Universitaire de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 83-93.
- [11] N. Janbu, 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests, Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, 1 9-25.
- [12] M. Massiera et al., 2006. Comportement des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment fondés sur des alluvions granulaires, The annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Calgary, Alberta, Canada, GC27-1- GC 27-10.
- [13] M. Khemissa, 2004. Comparaison de deux modèles pour l'analyse de la convergence des tunnels, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Ref.4486, M'sila, Algérie, 134-146.
- [14] N. Al-Shayea et al., 2001. Determination of parameters for a hyperbolic model of soil from the eastern province of Saudi Arabia, Proceeding of the institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 149, Issue 4 paper 13008, London, 1-14.
- [15] R.B.J. Brinkgreve et al., 2006. Manuel Plaxis 2D Version 8, Ed. Plaxis bv, 249p.
- [16] S. Likitlersuang et al., 2013. Parameters for hyperbolic stress strain behavior of soft Bangkok clay, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 381-384.
- [17] N.P. Honkanadavar & K.G. Sharma, 2016. Modeling the triaxial behavior of riverbed and blasted quarried rockfill materials using hardening soil model, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Chinese Academy of Sciences, 350 – 365.
- [18] C. Surarak et al., 2012. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays, *Soils and Foundations*, Vol. 52(4), Japanese Geotechnical Society, 682 – 697.
- [19] L.K. Hing et al., 2014. Determination of soil stiffness parameters at a deep excavation construction site in Kenny Hill Formation, *Elsevier*, London, 645-650.

NOMENCLATURE

- σ_1 : Contrainte principale majeure (KPa)
- σ_3 : Contrainte latérale (KPa)
- ε_1 : Déformation axiale
- E_i : Module de Young tangent initial (KPa)
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: Valeur asymptotique de la contrainte déviatorique (KPa)
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: Déviateur de contrainte à la rupture (KPa)
- R_f : Rapport de rupture
- K, K_b, K_{ur} et n : Paramètres expérimentaux
- m : Paramètre puissance
- P_a : Pression de référence (KPa)
- φ : Angle de frottement interne ($^\circ$)
- C : Cohésion (KPa)
- Q : Déviateur de contrainte (KPa)
- q_a : Valeur asymptotique du déviateur (KPa)
- E_{50} : Module d'élasticité tangent au premier chargement (KPa)
- q_f : Déviateur de contrainte ultime (KPa)
- E_{50}^{ref} : Module d'élasticité de référence (KPa)
- P^{ref} : Pression référentielle de notre étude (KPa)
- E_{ur} : Module d'élasticité pour le déchargement et rechargement (KPa)
- E_{ur}^{ref} : Module d'élasticité de référence pour le déchargement et rechargement (KPa)
- E_{oesd} : Module d'élasticité oedométrique (KPa)
- E_{oesd}^{ref} : Module tangent oedométrique de référence (KPa)