

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT CYCLIQUE DES SABLES EN CONDITIONS DRAINÉES - APPLICATIONS À UN SABLE DENSE

CONSTITUTIVE MODELLING OF THE CYCLIC BEHAVIOUR OF SANDS IN DRAINED CONDITIONS - APPLICATIONS TO A DENSE SAND

S. MESSAST^{1,2}, Marc BOULON², Etienne FLAVIGNY²

¹ *Laboratoire de Mathématique et de Calcul Scientifique (LARMACS), Département de Génie Civil, Université de Skikda, Skikda, Algérie*

² *Laboratoire Sols Solides Structures - Risques (3S-R), Université de Grenoble, France*

RÉSUMÉ – Cette communication présente une modélisation numérique du comportement cyclique des sables en conditions drainées. Pour une série de cycles, les paramètres importants sont le chemin cyclique moyen et l'amplitude des déformations lors du premier cycle de charge-décharge, puis lors des suivants. On s'intéresse à des essais triaxiaux cycliques simulés grâce au code de calcul éléments finis Plaxis. On détermine les paramètres d'identification lors du premier cycle (charge-décharge) réalisé pas à pas en prenant comme modèle de comportement du sol le modèle HSM (Hardening Soil Model). Puis le comportement après N cycles ($N > 10^3$) est simulé comme un pseudo-fluage dans lequel le nombre de cycles N est équivalent à un temps fictif. On peut alors simuler l'accumulation des déformations pour un très grand nombre de cycles.

Les applications présentées confirment la bonne adaptation du modèle aux types de problèmes rencontrés dans de nombreuses applications géotechniques (offshore, voies de circulation, vibrations, etc.).

Mots-clés : cyclique, chemin cyclique moyen, déformation volumique, accumulation, triaxial, condition drainée, sable.

ABSTRACT - This paper presents a numerical model of the cyclic behaviour of sands in drained conditions. For series of cycles, the important parameters are the mean cyclic path and the strain amplitude of the first cycle of loading unloading and the subsequent cycles. Within this study cyclic triaxial tests are simulated using the Finite Element code Plaxis. The identification parameters are assessed during the first cycle (loading-unloading) realised step-by-step by using the constitutive model HSM (Hardening Soil Model) for the soil. Then the behaviour after N cycles ($N > 10^3$) is simulated as a pseudo creep where the number of cycles N is considered as an equivalent time.

The applications presented confirm the good adaptation of the model to the types of problems encountered in many geotechnical applications (offshore, ways of circulation, vibrations, etc.).

Keywords: cyclic, mean cyclic path, volumetric strain, accumulation, triaxial, drained, sand.

1. Introduction

La prévision des déformations cycliques irréversibles des sols et de leur accumulation constitue un élément important dans le dimensionnement des ouvrages soumis à des charges cycliques ou situés à proximité de source d'excitations cycliques, tels que les routes, les ponts, les chemins de fer, les silos, les réservoirs, les structures offshore.

Si le nombre de cycles est très élevé ($N > 10^3$) les modèles « implicites » (chaque cycle est décrit pas à pas) ou incrémentaux sont déconseillés à cause de l'accumulation de l'erreur numérique (dès $N > 10$). De ce fait apparaît l'importance des modèles « explicites » (l'unité de chargement est le cycle entier) surtout pour un nombre de cycles très élevé. Dans de tels modèles, le premier cycle ou les quelques premiers cycles sont calculés incrémentalement en utilisant une loi de comportement classique et le reste des cycles est traité (éventuellement incrémentalement aussi) comme un pseudo-fluage. Plusieurs travaux ont été entrepris dans ce sens, pour établir des modèles de comportement cyclique des sols (Thanopolous, 1981 ; Marr et al, 1981 ; Wichtmann, 2005 ; Bouckovalas et al., 1984 ; Sawicki et Swidzinski, 1987 ; Niemunis et al., 2005)

Cette communication présente l'étude de l'influence des paramètres cycliques sur le comportement cyclique d'un sable dense, en utilisant un modèle explicite simple traitant le comportement cyclique comme un pseudo fluage. Les paramètres essentiels du modèle sont les paramètres d'identification du chemin cyclique moyen et ceux du premier cycle traité par le code de calcul éléments finis Plaxis en modélisant le comportement du sol par le modèle HSM.

2. Modèle de comportement

2.1. Déformation volumique

La contractance est représentée par une déformation volumique positive, en accord avec les conventions de la mécanique des sols. La figure 1 présente la définition de quelques paramètres du matériau et de la sollicitation cyclique dans le plan p-q. Dans ce plan, la sollicitation cyclique, définie en contraintes, est caractérisée par son niveau moyen (p_{moy} , q_{moy}), par la pente moyenne η_{moy} qui en découle, et par son amplitude en termes de pente $\Delta\eta$. La déformation volumique cumulée après N cycles $\varepsilon_{v,N}^c$ est formulée comme suit (Équation 1) :

$$\varepsilon_{v,N}^c = \frac{N}{\frac{1}{\varepsilon_{v,1}^c} + \frac{N-1}{\varepsilon_{v,\infty}^c}} \quad (1)$$

avec $\varepsilon_{v,\infty}^c$ déformation cumulée lorsque N tend vers l'infini et $\varepsilon_{v,1}^c$ déformation irréversible après le premier cycle. La déformation volumique cumulée à l'infini $\varepsilon_{v,\infty}^c$ peut être exprimée en fonction de η_{moy} et $\Delta\eta$ (figure 2) :

$$\varepsilon_{v,\infty}^c = \varepsilon_{v,0}^\infty \left(\frac{\eta_{moy} - 1}{\eta_{car}} \right) / \left(1 - \frac{\eta_{moy}}{\eta_l} \right) \quad (2)$$

avec :

$$\varepsilon_{v,0}^\infty = \frac{C_1 \Delta\eta}{\Delta\eta + C_2} \quad (3)$$

où C_1 et C_2 sont des constantes dépendant évidemment de η_{moy} et d'autres paramètres tels que la porosité et la granulométrie. On propose pour un sable dense les valeurs $C_1 = 4$ et $C_2 = 0,3$.

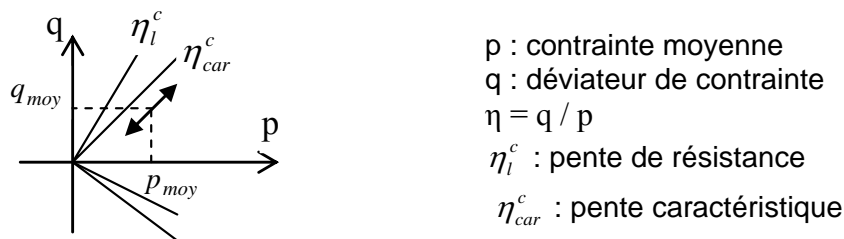


Figure 1. Définition des paramètres cycliques dans le plan p-q

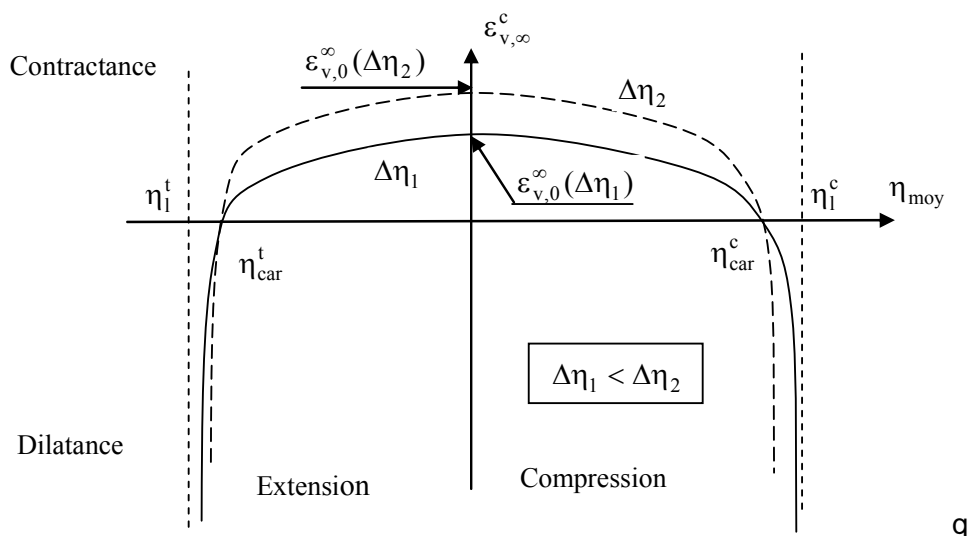


Figure 2. $\varepsilon_{v,\infty}^c$ en fonction de η_{moy} et $\Delta\eta$

2.2. Module sécant

Au cours des cycles de cisaillement, le sable se densifie ou se dilate selon la configuration des cycles appliqués et le module sécant des cycles varie en conséquence. Mais sa variation est très importante pendant les premiers cycles. Par contre, pour N très grand, on remarque généralement une stabilisation. On propose pour le module l'évolution de la forme puissance suivante :

$$E_N = E_0 \left(1 + \frac{I_{D0}}{I_{DN}}\right)^{(m_E \ln(N)+0,2)} \quad (4)$$

avec pour notations : E_N : module sécant après N cycles, E_0 : module sécant initial, I_{DN} : indice de densité après N cycles, I_{D0} : indice de densité initial, m_E : Exposant dépendant de la nature du matériau.

3. Applications

Dans cette partie, l'évolution de la déformation volumique cumulée sera déterminée en fonction du nombre de cycles. Les applications des sections 3.1, 3.2 et 3.3 seront faites sur un sable dense dont les caractéristiques selon le modèle HSM sont :

$\gamma = 17,5 \text{ kN/m}^3$, $E_{50}^{\text{ref}} = 37000 \text{ kPa}$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 90000 \text{ kPa}$, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 29600 \text{ kPa}$, $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$, cohésion $c=0$, angle de frottement interne $\varphi = 41 \text{ deg}$, angle de dilatance $\psi = 14 \text{ deg}$, coefficient de Poisson $\nu = 0,2$, exposant $m_E = 0,5$, coefficient de rupture $R_f = 0.9$, $\eta_l = 1,679$, $\eta_{\text{car}} = 1,436$.

3.1. Influence de la contrainte moyenne

Dans cette partie, on fait varier la contrainte moyenne $p_{\text{moy}} = 50, 100$ et 200 kPa pour des valeurs constantes de $\eta_{\text{moy}} = 0,75$ et $\Delta\eta = 0,9375$. Les courbes d'évolution de la déformation volumique en fonction du nombre de cycles N (fig. 3) montrent que l'accumulation de déformation (contractante) est d'autant plus importante que la contrainte moyenne est plus élevée.

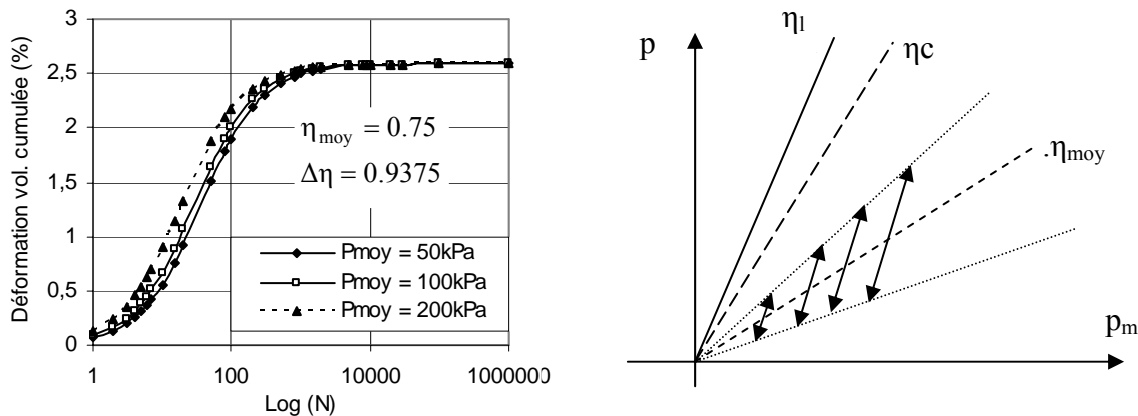


Figure 3. Influence de la contrainte moyenne sur l'évolution de $\varepsilon_{v,N}^c$ en fonction de N

3.2 Influence du niveau moyen des cycles

Dans cette partie, on fait varier le niveau moyen des cycles $0,4 \leq \eta_{\text{moy}} \leq 1,6$ et on garde constants la contrainte moyenne $P_{\text{moy}} = 200 \text{ kPa}$ et $\Delta\eta = 0,9375$. Les courbes d'évolution de la déformation volumique en fonction du nombre de cycles (figure 4) montrent que l'accumulation est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de la ligne caractéristique. Pour une série de cycles centrée en dessous de la ligne caractéristique le matériau est contractant ; par contre au-dessus de la ligne caractéristique le matériau est dilatat.

D'autre part on remarque que l'intensité de l'accumulation des déformations volumiques décroît avec le nombre de cycles. Elle est plus importante pour les premiers cycles et se stabilise lorsque N est supérieur à environ 10000 cycles. On remarque aussi que lorsque le niveau moyen

des cycles est très proche du seuil de résistance, les déformations volumiques cumulées deviennent très importantes.

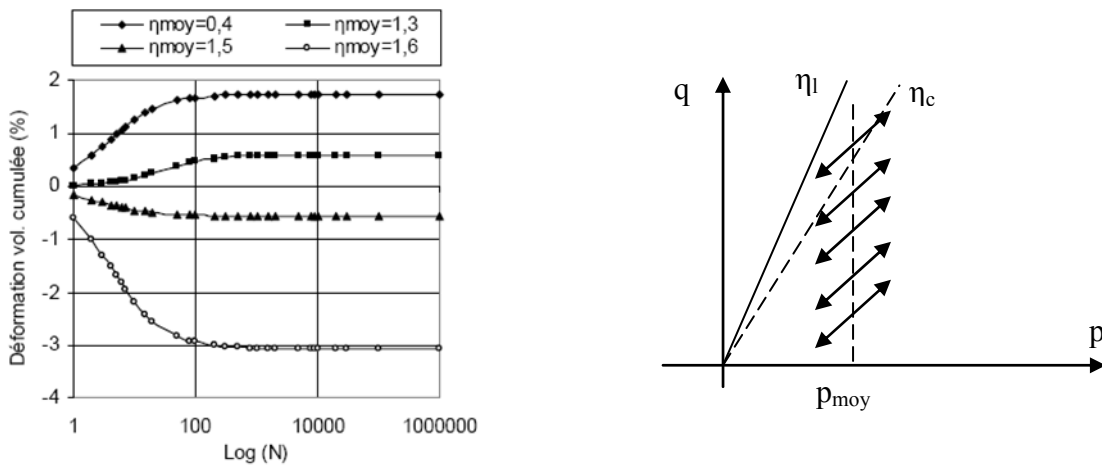


Figure 4. Influence du niveau moyen sur l'évolution de $\varepsilon_{v,N}^c$ en fonction de N

3.3 Influence de l'amplitude des cycles

Dans cette partie, on fait varier l'amplitude des cycles en gardant constants $p_{moy} = 200$ kPa et $\eta_{moy} = 0,75$. Les courbes d'évolution de la déformation volumique en fonction du nombre de cycles (figure 5) montrent que l'accumulation est d'autant plus importante que l'amplitude des cycles est plus importante et que l'intensité de cette accumulation décroît avec le nombre des cycles et devient très faible lorsque N dépasse 10000 cycles.

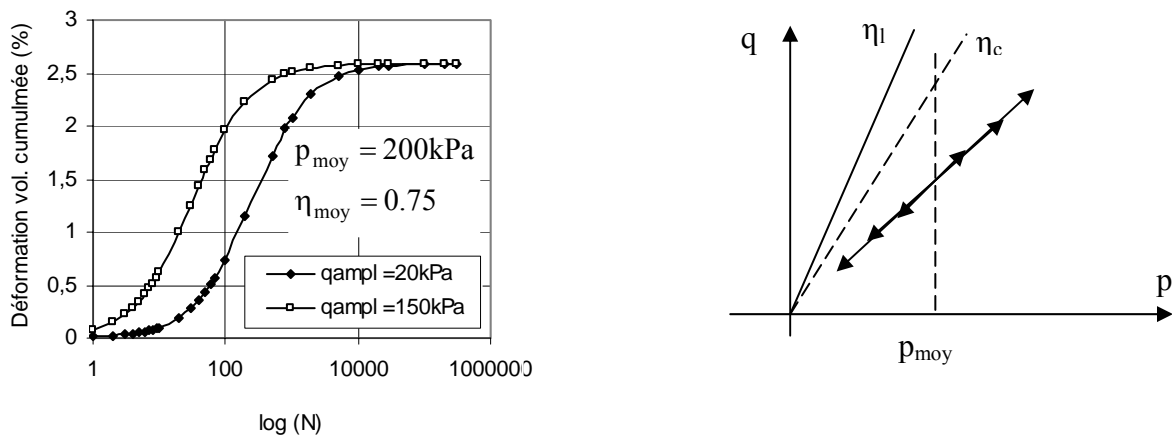


Figure 5. Influence de l'amplitude des cycles sur l'évolution de $\varepsilon_{v,N}^c$ en fonction de N

3.4 Influence d'une variation de l'amplitude des cycles

Dans cette partie on examine une sollicitation comportant une variation de l'amplitude des cycles, et l'évolution de la déformation volumique cumulée avec le nombre de cycles. Le sable (d'Hostun) est dense, et caractérisé par les paramètres HSM :

$$\gamma = 15,57 \text{ kN/m}^3, E_{50}^{\text{ref}} = 27370 \text{ kPa}, E_{ur}^{\text{ref}} = 82120 \text{ kPa}, E_{oed}^{\text{ref}} = 27370 \text{ kPa}$$

$$p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}, c = 0, \varphi = 40,9 \text{ deg}, \psi = 11,1 \text{ deg}, \nu = 0,15, m_E = 0,5, R_f = 0,9$$

$$e_{\text{max}} = 1,02, e_{\text{min}} = 0,65, e_0 = 0,718, \eta_l = 1,673, \eta_{\text{car}} = 1,46$$

En premier lieu, on estime le coefficient m_E . Pour ce faire on considère la série de cycles ci-dessus, comportant 10^5 cycles (figure 6), calculée selon deux méthodes.

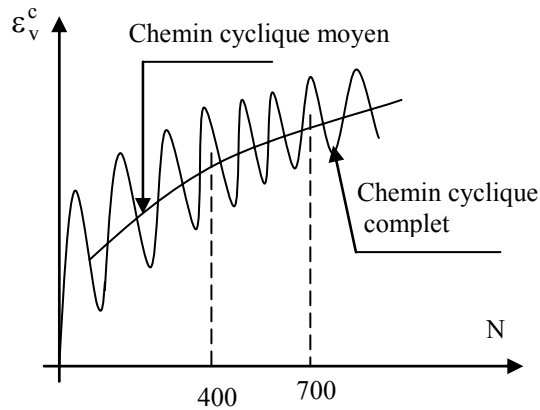


Figure 6. Chemins cycliques

Dans la première méthode, la série est calculée d'une seule traite (cycle 1 incrémentalement, cycles 2 à 10^5 en pseudo-fluage à partir de l'état en fin de cycle 1). Dans la seconde méthode, on fractionne cette série en trois sous-séries : cycles 1 à 400, cycles 401 à 700, et cycles 701 à 10^5 , en calculant pas à pas les cycles 1, 401 et 701, et en appliquant la procédure de pseudo-fluage cyclique aux cycles 2 à 400 à partir de l'état en fin de cycle 1, aux cycles 402 à 700 à partir de l'état en fin de cycle 401, et enfin aux cycles 702 à 10^5 à partir de l'état en fin de cycle 701. Au terme de ces deux calculs, et en comparant les déformations volumiques cumulées, nous avons ré-estimé l'exposant m_E pour ce sable, égal à la valeur 0,55.

La figure 7 montre un bon accord entre la courbe d'évolution de la déformation volumique cumulée tracée sur la base des paramètres du premier cycle et celle tracée sur la succession de la première sous-série de cycles (de 1 à 400), de la seconde (entre 401 et 700), et enfin de la troisième (entre 701 et 10^5).

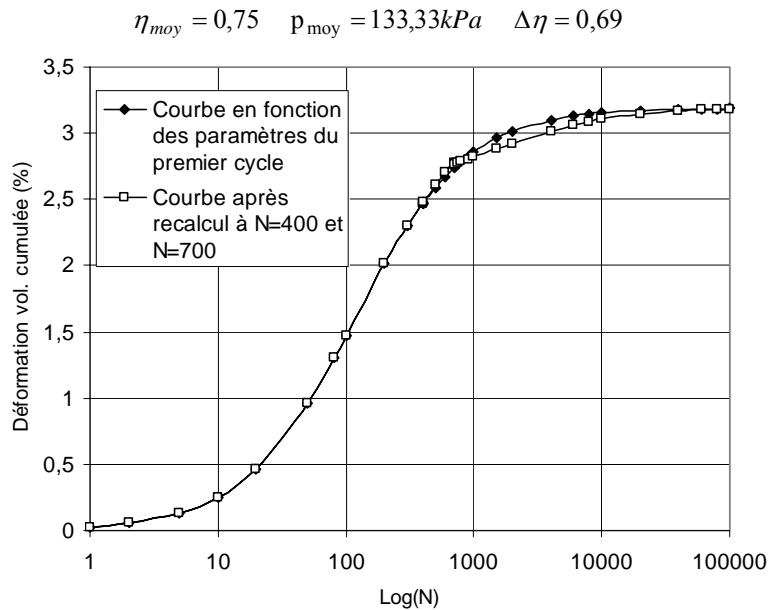


Figure 7. Évolution de la déformation volumique cumulée en fonction de N

Après ce premier test, nous avons réalisé deux séries successives de cycles sur le sable, la première à faible amplitude cyclique (30 kPa) jusqu'à 1000 cycles, et le reste des cycles à une grande amplitude cyclique (60 kPa), et puis l'inverse. Tous ces cycles se situent, vu leur niveau moyen, dans le domaine de la contractance.

D'après la figure 8, la courbe correspondant à des cycles de faible amplitude suivis de cycles à grande amplitude fait apparaître une contractance finale supérieure à celle correspondant à l'application des cycles dans l'ordre inverse, y compris pour un même nombre de cycles dans chaque série (1000). Ainsi, l'ordre des cycles est important, et l'effet des derniers cycles est prépondérant. Notamment, l'application de petits cycles après les grands est pratiquement sans effet en terme de déformation volumique, ce qui caractérise un écrouissage du matériau.

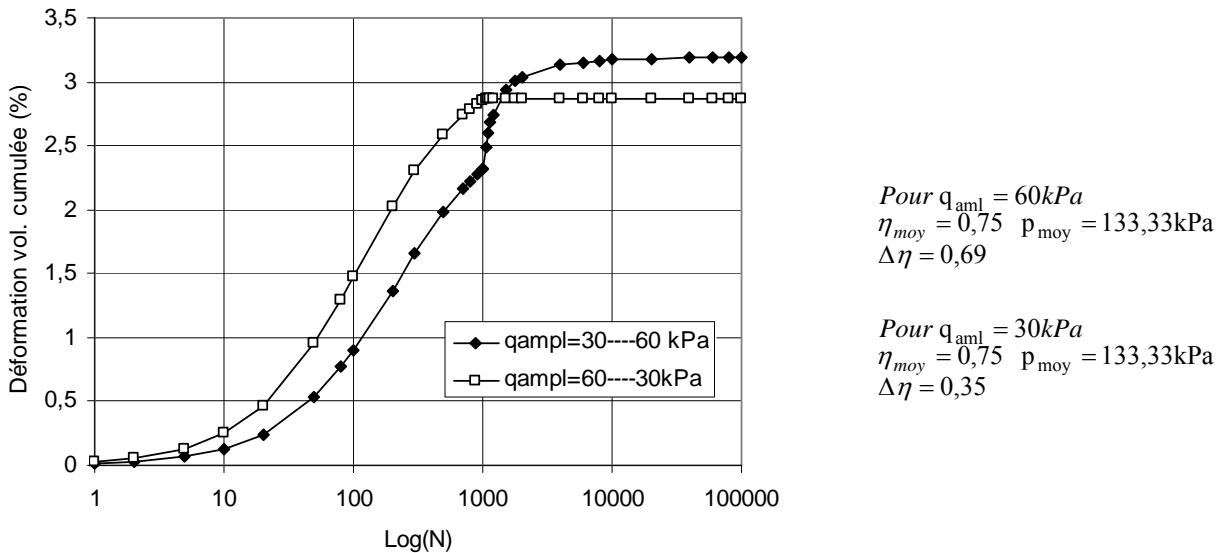


Figure 8. Influence de la variation de l'amplitude cyclique sur l'évolution de la déformation volumique cumulée

4. Conclusion

Dans cette étude, le comportement cyclique des sables est modélisé grâce à un modèle constitutif relativement simple simulant le grand nombre de cycles par pseudo fluage cyclique, en vue d'applications éléments finis aux géo-ouvrages. Dans cette démarche, la déformation volumique cumulée après N cycles est exprimée en fonction du chemin cyclique moyen dans le plan p-q, ainsi que de la déformation volumique irréversible après le premier cycle. L'évolution du module sécant est aussi déterminée en fonction du module initial et des variations de l'indice de densité.

L'application du modèle présenté sur un sable dense montre que l'accumulation des déformations volumiques s'accroît avec le nombre de cycles et se stabilise pour un grand nombre de cycles. Cette intensité augmente avec l'augmentation de l'amplitude des cycles et l'éloignement du niveau moyen des cycles de la ligne caractéristique. D'autre part on remarque que l'influence de la contrainte moyenne reste relativement faible.

5. Références

- Bouckovalas G., Whitman R.V., Marr W.A. (1984). Permanent displacement of sand with cyclic loading. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE*, vol.110, N° 11, pp. 1606-1623.
- Marr W.A., Christian J.T. (1981). Permanent displacements due to cyclic wave loading. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE*, vol.107, N°. GT8, pp. 1129-1149.
- Niemunis A., Wichtmann T., Triandafyllidis Th. (2005). A high-cycle accumulation model for sand. *Computers and geotechnics*, vol. 32, pp. 245-263.
- Sawicki A., Swidzinski W. (1987). Compaction curve as one of basic characteristics of granular soils. *Comptes-rendus, 4^{ème} Colloque franco-polonais de mécanique des sols appliquée*, Grenoble, Vol. 1, pp. 103-115.
- Thanopoulos I. (1981). Contribution à l'étude du comportement cyclique des milieux pulvérulents, Thèse de Docteur-Ingénieur, USMG et INPG, Grenoble.
- Wichtmann T., Niemunis A., Triandafyllidis Th. (2005). Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained cyclic tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 25, pp. 967-979.
- Wichtmann T. (2005). Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading, thèse de doctorat, Université de Bochum.