

## Modélisation constitutive du comportement cyclique des sables en condition drainée

S. Messast<sup>\*,\*\*</sup>, M. Boulon<sup>\*\*</sup>, E. Flavigny<sup>\*\*</sup> et S. Labanieh<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> *Laboratoire de Mathématiques et de Calcul Scientifique (LARMACS)  
Département de Génie Civil, Université de Skikda  
BP 26, Route d'Elhadeik, 21000, Skikda, Algérie  
Email : smessast@yahoo.fr*

<sup>\*,\*\*</sup> *Laboratoire Sols Solides Structures (3S), Université Joseph Fourier  
BP 53, 38041, Grenoble cedex 9, France*

### Résumé :

*Des déformations considérables apparaissent dans les structures lors de l'accumulation des déformations irréversibles du sol de fondation sous l'effet des charges cycliques. Si le nombre de cycles est très grand même des "petites déformations" après accumulation deviennent importantes et parfois nuisibles.*

*Dans cette étude, une modélisation numérique simple du comportement des sables sous chargement cyclique est proposée. La démarche proposée consiste, en condition drainée, à déterminer les paramètres caractérisant le chemin cyclique moyen du sol sous l'effet de N cycles dûment caractérisés, et à traduire l'effet cyclique par une déformation volumique cumulée ainsi que par une variation du module du sol. Dans cette étude, on s'intéresse à des essais triaxiaux cycliques simulés au moyen d'un calcul en éléments finis utilisant le programme Plaxis. On détermine les paramètres d'identification du premier cycle (charge-décharge) réalisé pas à pas en prenant, comme modèle de comportement du sol le modèle HSM. Puis le comportement après N cycles ( $N > 10^3$ ) est simulé par la formulation proposée comme un pseudo-fluage.*

*La comparaison de la méthode proposée à plusieurs essais triaxiaux cycliques confirme la bonne adaptation du modèle proposé à ce type de problèmes.*

### Abstract :

*Considerable strains appear in the structures at the time of the irreversible strains accumulation of the foundation soil under the effect of the cyclic loads. If the number of cycles is very high even "small strains" after accumulation become important and sometimes harmful.*

*In this study, a simple numeric modelling of the behaviour of the sands under cyclic loading is proposed. The proposed approach consists, in drained condition, to determine the parameters characterizing the average cyclic path of soil under the effect of N cycles duly characterized, and to translate the cyclic effect by an accumulated volumetric strain as well as by a variation of the soil modulus. In this survey, triaxial cyclic tests are simulated by means of a calculation by Finite Elements Method using the Plaxis program. The identification parameters determination of the first cycle (load-unload) realised step-by-step was achieved by taking, as behaviour model of soil the HSM model. Then the behaviour after N cycles ( $N > 10^3$ ) is simulated by the proposed formulation as a pseudo fluage.*

*The comparison of the proposed method to several triaxial cyclic tests confirms the good adaptation of the proposed model to this type of problems.*

**Mots-clefs : cyclique ; condition drainée ; sable**

## 1 Introduction

Beaucoup d'ouvrages sont susceptibles d'être soumis à des charges cycliques soit en situations normales ou accidentelles tels que les routes, les ponts, les chemins de fer, les silos, les réservoirs, les fondations pour machines vibrantes.....etc. Cependant l'accumulation des déformations du sol provoque des désordres et même parfois des effets néfastes dans ces structures ou les structures avoisinantes. D'où la nécessité de prédire l'accumulation des déformations cycliques irréversibles.

Il existe deux catégories d'approches pour la prédiction du comportement cyclique des matériaux : approches implicites et explicites. Les modèles implicites ou incrémentales nécessitent plusieurs (des centaines) incréments par cycle ce qui induit une accumulation de l'erreur numérique et une imprécision des résultats pour un nombre de cycles élevé. D'une manière générale ce type de modèles est souhaitable pour  $N < 50$ . De ce fait apparaît l'importance des modèles explicites surtout pour un nombre de cycle élevé ( $N > 1000$ ). Dans tels modèles uniquement un ou quelques premiers cycles sont calculés à l'aide d'un calcul incrémentale, et le reste des cycles sera traité comme un pseudo-fluage. Plusieurs travaux ont été entrepris dans ce sens (Thanopoulos, 1981 ; Marr *et al*, 1981 ; Bouckovalas *et al*, 1984 ; Sawicki *et al*, 1987 ; Wichtmann , 2005 ; Niemunis *et al* 2005).

Cette communication présente un modèle explicite simple pour la modélisation constitutive du comportement cyclique des sables en condition drainée. On propose une formulation hyperbolique pour l'estimation des déformations volumiques cumulées en se basant sur les paramètres d'identification du chemin cyclique moyen et ceux du premier cycle qui sera traité par un calcul en éléments finis à l'aide du programme Plaxis et en prenant comme modèle de comportement du sol le modèle HSM (Hardening Soil Model). L'évolution du module du sol est exprimée par une formulation puissance.

## 2 Modèle proposé :

### 2.1 Déformation volumique :

La figure 1 présente la définition des paramètres cycliques dans le plan p-q.

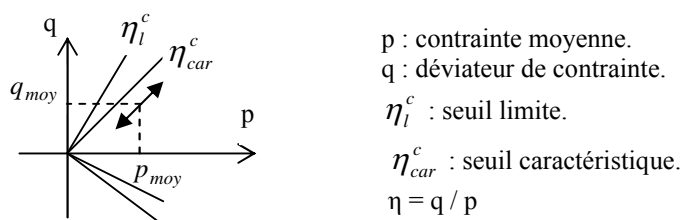


Fig. 1 Définition des paramètres cycliques dans le plan p-q

La déformation volumique cumulée après N cycles  $\varepsilon_{v,N}^c$  est formulée comme suit :

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

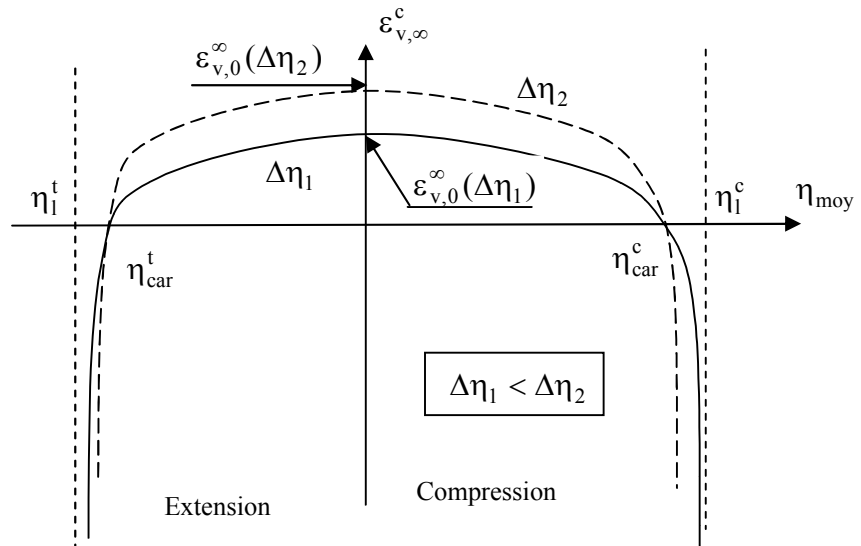
$\varepsilon_{v,\infty}^c$  est la déformation cumulée lorsque  $N \rightarrow \infty$ .

$\varepsilon_{v,1}^c$  est la déformation irréversible après le premier cycle.

$\varepsilon_{v,\infty}^c$  peut être exprimé en fonction de  $\eta_{moy}$  et  $\Delta\eta$  (fig. 2) :

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

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



Prenons deux séries d'essais du tableau 1 (thanopoulos,1981), de tel façon que  $\eta_{moy}$  reste constant pour chaque série et  $\Delta\eta$  variable. Si on suppose que  $\varepsilon_{v,\infty}^c$  correspond à la valeur maximale lu sur les courbes données par Thanopoulos (1981), on peut déterminer  $\varepsilon_{v,0}^\infty$  pour différentes valeurs de  $\Delta\eta$ .

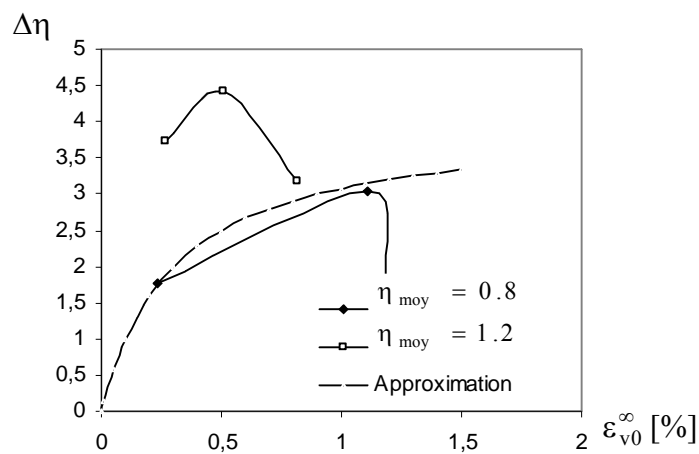


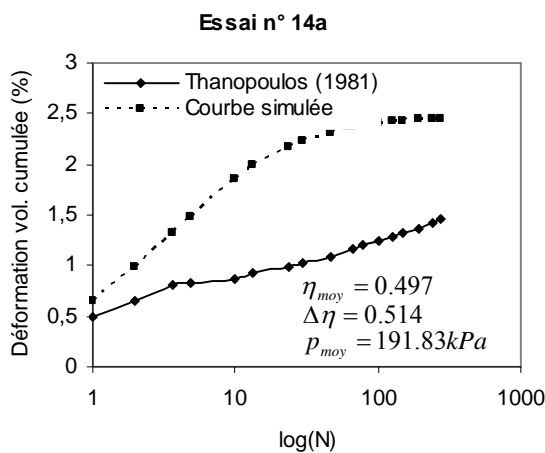
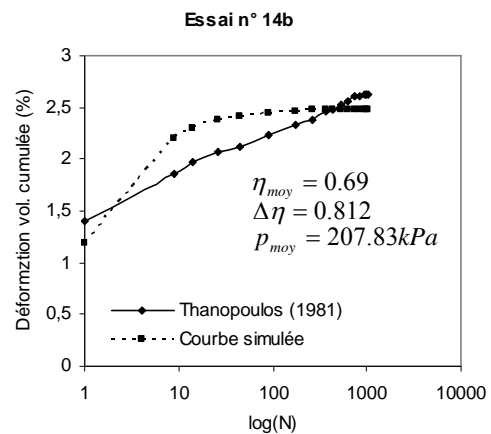
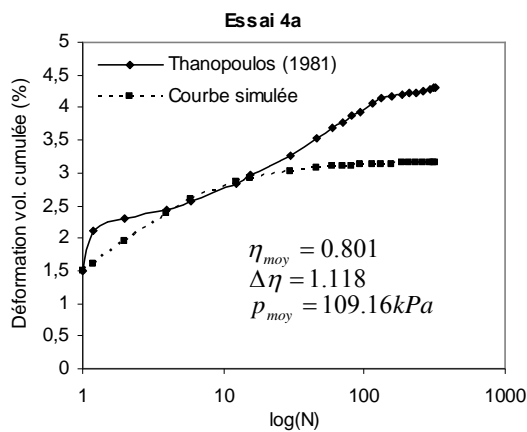
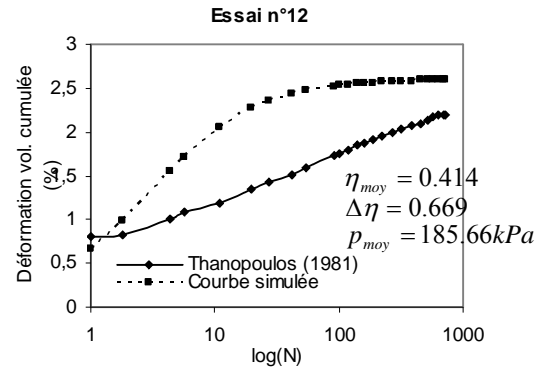
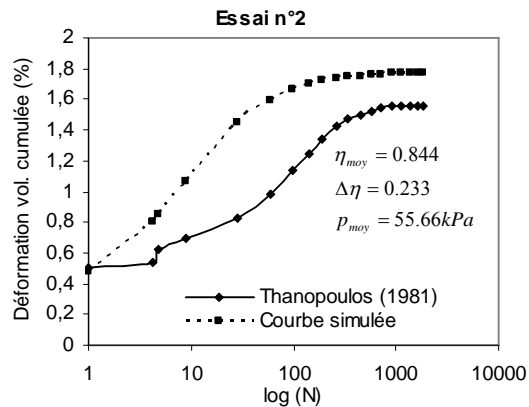
Figure 3. Dépendance de  $\varepsilon_{v,0}^\infty$  en fonction de  $\Delta\eta$ , d'après Thanopoulos (1981).

A partir de la figure 3, la fonction  $\varepsilon_{v0}^{\infty} = f(\Delta\eta)$  peut être écrite sous la forme suivante :

$$\varepsilon_{v0}^{\infty} = \frac{C_1 \Delta\eta}{\Delta\eta + C_2} \tag{3}$$

Avec  $C_1 = 4$  et  $C_2 = 0.3$ . Dans la formule (3), les coefficients  $C_1$  et  $C_2$  dépendent évidemment de  $\eta_{moy}$  et d'autres paramètres tel que la porosité et la granulométrie.

Dans le but de tester la fiabilité de la formulation proposée, on procède à la comparaison des résultats obtenus par cette méthode avec ceux tirés du travail de Thanopoulos (1981).



La comparaison des courbes d'évolution de la déformation volumique en fonction du nombre de cycles est faite pour les essais qui présentent une conformité entre les essais simulés et les valeurs mesurées à savoir les essais : 1, 2, 4a, 12, 14a et 14b

L'essai 1 n'est pas exploité car après le premier cycle a été marqué un temps d'arrêt de 10 heures.

Fig. 4 Courbes (déformation vol.-N) simulées et expérimentales d'après Thanopoulos (1981)

Thanopoulos a effectué des essais cycliques sur le sable fin de Plancoet relativement lâche caractérisé par son poids volumique sec de 12,5 kN/m<sup>3</sup> et les courbes q- $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_v$ -  $\varepsilon_1$  pour un essai triaxial monotone et une série d'essais triaxiaux cycliques. En se basant sur l'essai 8 (essai monotone), le sable de Plancoet sera caractérisé selon le modèle HSM par :

$E_{50}=E_{oed}=6689\text{kPa}$ ,  $E_{ur}=867.10^2\text{kPa}$ ,  $\varphi=37.6^\circ$ ,  $c=0$ ,  $\psi=6^\circ$ ,  $R_f=0.9$ ,  $m=0.4$ .

Le modèle HSM est un modèle de comportement des sols à écrouissage. Il prend en compte l'évolution du module de déformation avec la variation de la contrainte de confinement. L'effet de dilatance est pris aussi en compte dans ce modèle.

Tableau 1. Paramètres des essais cycliques en compression réalisés sur le sable fin de Plancoet, d'après Thanopoulos, (1981) :

Essai	$\sigma_3$ [kPa]	N	$q_{min}$ [kPa]	$q_{max}$ [kPa]	$\varepsilon_v^\infty$ (essai) [%]	$\eta_{moy}$	$\Delta\eta$	$\varepsilon_v^\infty$ (calculé) [%]	$\varepsilon_{v,1}^{total}$ (calculé) [%]	$\varepsilon_{v,1}^{irr}$ [%]	$\varepsilon_{v,1}^{mesuré}$ [%]
1	40	1670	4	89	1.5	0.837	1.18	2,6873	<b>0.829</b>	0.7	<b>0.8</b>
2	40	2300	38	56	1.6	0.844	0.233	1,4692	<b>0.502</b>	0.15	<b>0.5</b>
4a	80	406	9	166	2.5	0.801	1.118	2,6967	<b>1.2</b>	1.0	<b>1.5</b>
4b	80	201	115	237	2.7	1.269	0.518	1,3982	1.1		2.5
7	80	1274	67	166	3.6	0.980	0.571	2,0518	1.2		2.0
8	80	1				0	0	0			
9	80	23	116	172	2.6	1.125	0.274	1,3253	3.5		2.3
11	40	2758	37	125	2.1	1.209	0.823	1,817	2.3		1.6
12	160	708	6	148	2.2	0.414	0.669	2,6152	<b>0.744</b>	0.65	<b>0.8</b>
13	160	352	3	323	4.5	0.760	1.188	2,7724	1.7		2.6
14a	160	256	37	154	1.4	0.497	0.514	2,3531	<b>0.758</b>	0.83	<b>0.7</b>
14b	160	1045	37	250	2.6	0.690	0.812	2,5946	<b>1.3</b>	1.03	<b>1.4</b>
16	80	1932	143	182	1.6	1.211	0.173	0,9058	1.3		0.95

La figure 4 montre que les courbes théoriques et expérimentales (Thanopoulos, 1981) sont relativement en bon accord ce qui confirme l'adaptation de la méthode proposée pour ce type de problèmes.

## 2.2 Module sécant

On propose la formulation puissance suivante pour l'évolution du module sécant avec le nombre de cycles :

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

$E_N$  : module sécant après N cycles,  $E_0$  : module sécant initial,  $I_{DN}$  : indice de densité après N cycles,  $I_{D0}$  : indice de densité initiale,  $m_E$  : Coefficient dépendant de la nature du matériau.

Pour valider la fiabilité de cette dernière formulation, une comparaison est faite aux résultats, présentés par Wichtmann (2005), relatifs à un essai triaxial cyclique sur un sable fin ( $I_{D0}=0.595$ ,  $e_{max}=0.874$ ,  $e_{min}=0.577$ ,  $P_{moy}=200\text{kPa}$ ,  $\eta_{moy}=0,75$ ,  $\eta_l=1.54$ ,  $\eta_{car}=1.21$ ,  $\varepsilon_v^1=0.1$ )

L'indice des vides initiale était  $e_0=0.698$ , on en déduit le paramètre :  $m_E=0,02$

La figure 5 montre un bon accord entre la courbe simulée et celle expérimentale.

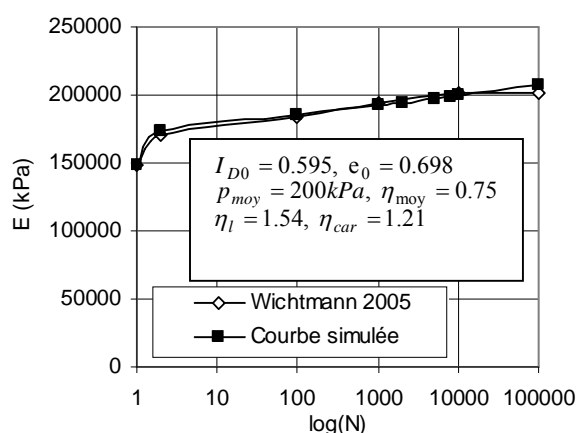


Fig. 5 Module sécant en fonction du nombre de cycles (Courbe simulée et courbe expérimentable d'après T. Wichtmann, 2005)

### 3 Conclusion

Dans cette étude, une approche simple pour la modélisation du grand nombre de cycles entant que pseudo fluage cyclique a été présentée. 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 la déformation volumique irréversible après le premier cycle. L'évolution de module sécant est aussi déterminée en fonction du module initial et des variations de l'indice de densité.

La comparaison au niveau homogène entre les résultats obtenus par cette méthode et les essais effectués par Thanopoulos (1981) et Wichtmann (2005), confirme l'adaptation du modèle proposé à ce type de problèmes.

### 4 Références

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