

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES SOUS CHARGEMENTS MONOTONE ET CYCLIQUE

M. BELKHATIR : Chargé de Cours, Université de Chlef
 H. MISSOUM : Maître de Conférences, Université de Mostaganem
 I. SHAHROUR : Professeur, Université de Lille

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous présentons les résultats des essais monotones et cycliques d'interface sols-structures qui ont été réalisés avec le sable de O/Chlef dense et lâche et des surfaces lisse et rugueuse à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Un intérêt particulier a été porté sur le comportement cyclique qui a fait l'objet d'un nombre réduit de travaux antérieurs. Les essais ont été réalisés pour analyser l'influence sur ce comportement des principaux paramètres, à savoir : la densité du sable, la rugosité de l'interface, le niveau et la forme des cycles de chargement.

Mots-Clés

Cisaillement, interface, sols-structures, rugueuse, lisse, comportement, essais monotones et cycliques.

1. INTRODUCTION

L'analyse de l'interaction sols-structures représente un domaine important en géomécanique. Il concerne de nombreux problèmes en Génie Civil, les exemples les plus fréquents sont les fondations superficielles, les pieux, les murs de soutènement, les tunnels, les remblais, et les sols renforcés.

Pour les structures soumises à des chargements monotones ou cycliques, dont les origines sont: le vent, la houle, le trafic et le séisme; il est important de décrire clairement le comportement de l'interface, compte tenu que la stabilité de ces ouvrages est souvent liée aux conditions à l'interface.

L'objectif de ce travail est une contribution à l'étude expérimentale du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique. Devant le déficit de données expérimentales sous chargement cyclique, une partie importante de ce travail a été consacrée à la réalisation des essais d'interface cyclique.

Au cours de ces essais, nous avons étudié l'influence de nombreux paramètres, notamment: la densité du sol, la rugosité de la surface, le niveau de confinement, le chemin de contrainte et le niveau et la forme de l'amplitude du chargement.

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Une description du dispositif expérimental utilisé et les tests de répétabilité vérifiant sa fiabilité et du mode opératoire suivi sont donnés dans [1].

La figure 1 illustre la courbe granulométrique du sable de O/Chlef. Ses caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux 1 et 2 [1].

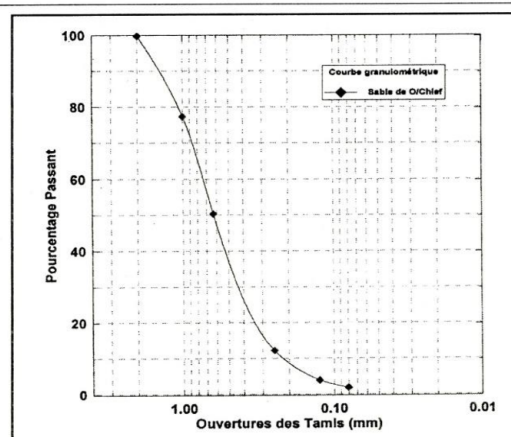


Figure-1 Courbe granulométrique du sable testé

Matériaux	e_{\min}	e_{\max}	$\gamma_{d\min}$ (KN/m ³)	$\gamma_{d\max}$ (KN/m ³)	γ_s (KN/m ³)	D_{50} (mm)
O/Chlef	0.642	0.99	13.36	16.19	26.6	0.63

Tableau-1 Les caractéristiques du sable de O/Chlef

Sable	O/Chlef	
Densité	Dense	Lâche
ϕ (°)	40.53	39.52

Tableau-2 Les valeurs de l'angle de frottement du sable de O/Chlef

B/ ESSAIS MONOTONES

Une série d'essais de cisaillement direct monotone a été réalisée pour étudier l'influence des principaux paramètres (la rugosité, la densité initiale et la contrainte normale initiale) sur le comportement de l'interface sols-structures.

La figure 2 montre les résultats d'un essai avec surface rugueuse et sable dense ($D_r = 90\%$). On constate que la contrainte de cisaillement augmente au cours du chargement et atteint un pic

Pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 1.4 mm, puis elle diminue pour se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 3.2 mm. Par contre le comportement normal de l'échantillon est contractant au début de l'essai, ensuite il devient dilatant à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 0.4 mm. On note que la dilatance s'amplifie avec la diminution de la contrainte normale initiale appliquée. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Rezaie [2]. Les résultats avec un sable lâche ($Dr = 15\%$) sont présentés dans la figure 3. On constate que la contrainte de cisaillement ne présente pas de phase de radoucissement et que le déplacement normal est contractant avec une phase quasi-stable du déplacement normal en fin d'essai.

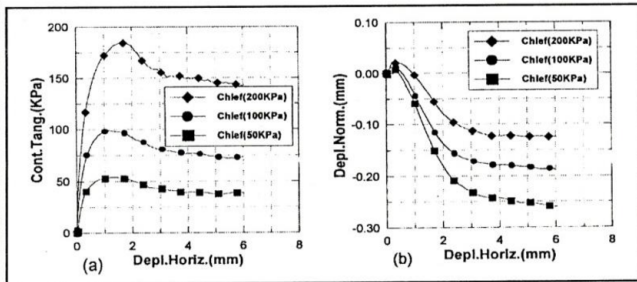


Figure-2 Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface rugueuse, sable de O/Chlef dense ($Dr = 90\%$)
a: Evolution de la contrainte tangentielle
b: Evolution du déplacement normal

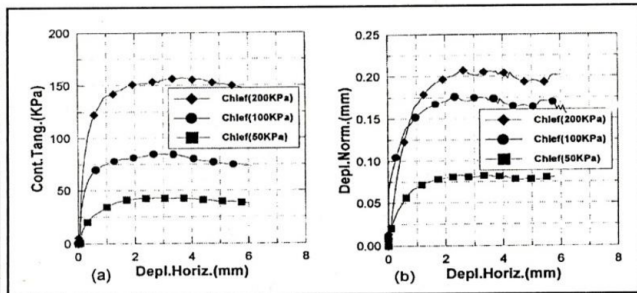


Figure-3 Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface rugueuse, sable de O/Chlef lâche ($Dr = 15\%$)
a: Evolution de la contrainte tangentielle
b: Evolution du déplacement normal

Les résultats des essais de cisaillement à contrainte normale constante avec une surface lisse sont donnés dans les figures 4 et 5. On constate que la contrainte de cisaillement croît rapidement au début du chargement pour atteindre un pic, puis elle diminue légèrement avant de se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 2.5 mm. En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que le comportement est contractant tout le long de l'essai. On note que la contractance s'amplifie avec la contrainte normale initiale appliquée. Pour un sable lâche, on note un comportement qualitativement similaire à celui d'un sable dense, avec cependant des valeurs inférieures de la résistance de l'interface et des valeurs supérieures du déplacement normal.

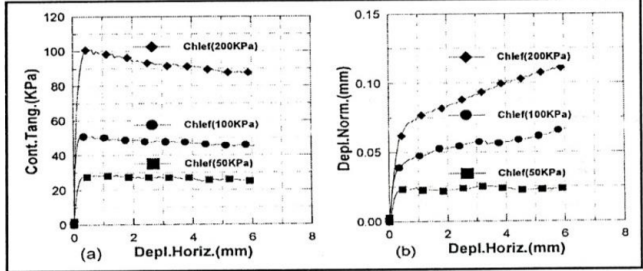


Figure-4 Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface lisse, sable de O/Chlef dense ($Dr = 90\%$)
a: Evolution de la contrainte tangentielle
b: Evolution du déplacement normal

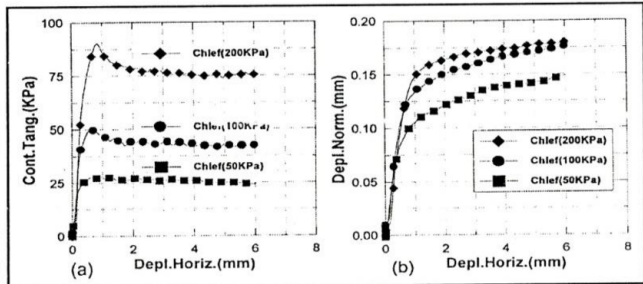


Figure-5 Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface lisse, sable de O/Chlef lâche ($Dr = 15\%$)
a: Evolution de la contrainte tangentielle
b: Evolution du déplacement normal

Le tableau 3 illustre les valeurs des angles de frottement interne et de dilatance déterminées à partir de ces essais. On constate que l'angle de frottement interne dépend à la fois de la densité initiale et de la rugosité de la surface. L'angle de frottement de la surface rugueuse est proche de celui du sable, alors que pour le sable lâche, l'angle de frottement est de 90% de la valeur mesurée avec une interface rugueuse (tableau 3).

L'angle de dilatance (figure 6) diminue avec la contrainte normale initiale appliquée. Cette diminution est de 5° lorsque cette dernière augmente de 50 à 200 KPa.

Sable	O/Chlef			
	Dr = 90 %		Dr = 15 %	
Interface	Rugueuse	Lisse	Rugueuse	Lisse
ϕ ($^\circ$)	42.4	27.05	38.44	24.97

Tableau-3 Les valeurs de l'angle de frottement interne du sable de O/Chlef pour

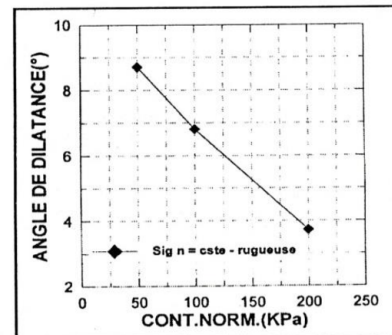


Figure-6 Evolution de l'angle de dilatance.
Sable de O/Chlef dense ($Dr = 90\%$)

C/ ESSAIS CYCLIQUES

Le comportement cyclique de l'interface a été étudié sur le chemin à contrainte normale constante et ceci pour les deux densités (dense et lâche) et deux types de surfaces (rugueuse et lisse). Tous les essais ont été réalisés à une contrainte normale initiale de 100 KPa.

La figure 7 illustre les résultats d'un essai cyclique alterné en déplacement horizontal contrôlé dans le domaine post-pic ($-2\text{ mm} \leq y \leq +2\text{ mm}$). On remarque que le chargement cyclique induit une diminution de la contrainte de cisaillement maximale mobilisée aux cours des cycles. Après 15 cycles, la diminution de la contrainte de cisaillement maximale est de l'ordre de 20 kPa, soit 20% par rapport à la contrainte mobilisée lors du chargement monotone. Ceci traduit un phénomène d'adoucissement cyclique. On note que les boucles d'hystérésis contrainte déformation se ferment légèrement à partir du deuxième cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que les cycles de chargement comportent une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance. On note que le comportement est globalement contractant. Après 15 cycles de chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1.4 mm. On note également que l'amplitude du déplacement normal cumulé par cycle diminue avec le nombre de cycles. A chaque inversion du chargement, on note un comportement contractant de l'interface qui traduit un réarrangement et serrage de grains dans la zone de l'interface.

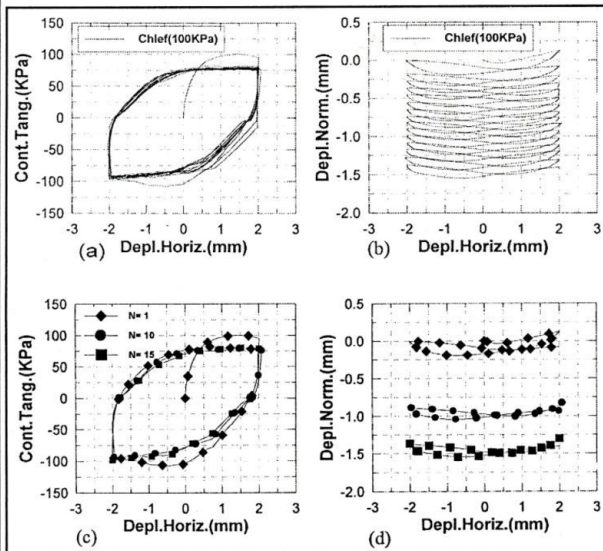


Figure-7 Essai cyclique à contrainte normale constante, $-2\text{ mm} \leq y \leq +2\text{ mm}$
Sable de O/Chlef, surface rugueuse, $D_r = 90\%$
(a, b : Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
(c, d : τ et ϵ_n aux cycles 1, 10, 15)

3. EFFET DE LA DENSITE

Les figures 8 et 9 montrent les résultats de deux essais cycliques alternés en déplacement horizontal contrôlé ($-1\text{ mm} \leq Y \leq +1\text{ mm}$) réalisés avec une interface rugueuse et un sable lâche et dense. On constate que le chargement cyclique induit une augmentation de la contrainte de cisaillement, traduisant le phénomène de durcissement cyclique de l'interface. On note que

l'écroutissage est beaucoup plus marqué dans le cas de sable lâche. Concernant le déplacement normal, on constate que les cycles de chargement comportent une phase de contractance suivie d'une légère phase de dilatance plus significative dans le cas du sable dense. Le taux de contractance est plus important dans le cas du sable lâche, particulièrement en début de chargement. Le comportement normal est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle.

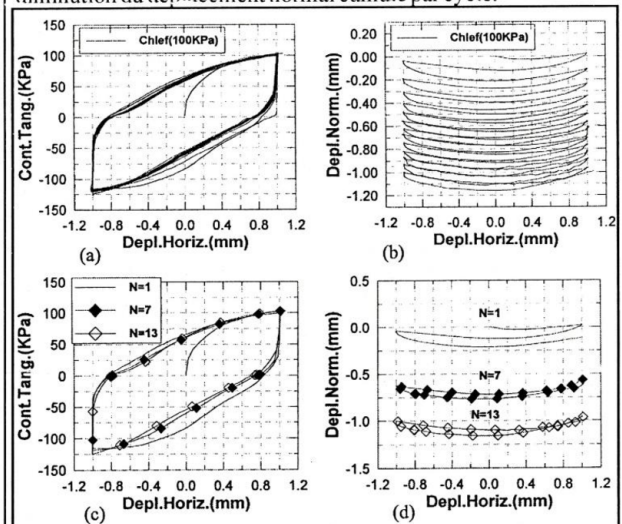


Figure-8 Essais cycliques à contrainte normale constante, $-1\text{ mm} \leq Y \leq +1\text{ mm}$
Sable de O/Chlef, surface rugueuse, $D_r = 90\%$
(a, b : Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
(c, d : τ et ϵ_n aux cycles 1, 7, 13)

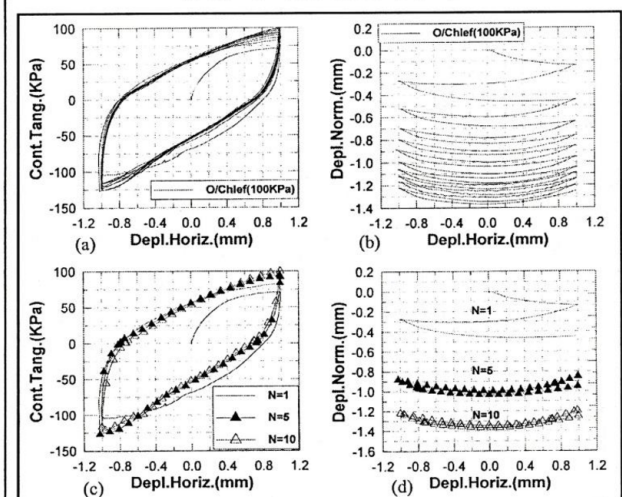


Figure-9 Essai cyclique à contrainte normale constante, $-1\text{ mm} \leq y \leq +1\text{ mm}$ Sable de O/Chlef, surface rugueuse, $D_r = 15\%$
(a, b : Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
(c, d : τ et ϵ_n aux cycles 1, 5 et 10)

4. EFFET DE LA RUGOSITE

Les figures 10 et 11 illustrent les résultats de deux essais cycliques alternés en déplacement horizontal contrôlé ($-1\text{ mm} \leq y \leq +1\text{ mm}$) avec une surface lisse et respectivement un sable dense et lâche. On constate que le chargement induit un durcissement

Cyclique qui dépend de la densité du sable. On note que pour un sable dense, on observe un adoucissement, alors que pour un sable lâche, un durcissement. Concernant l'évolution du déplacement normal, l'interface avec un sable lâche montre un comportement contractant, alors qu'avec un sable dense elle montre un comportement contractant à chaque inversion du chargement, suivi par une phase quasi-stable du déplacement normal. Le comportement est globalement contractant, particulièrement pour le sable lâche.

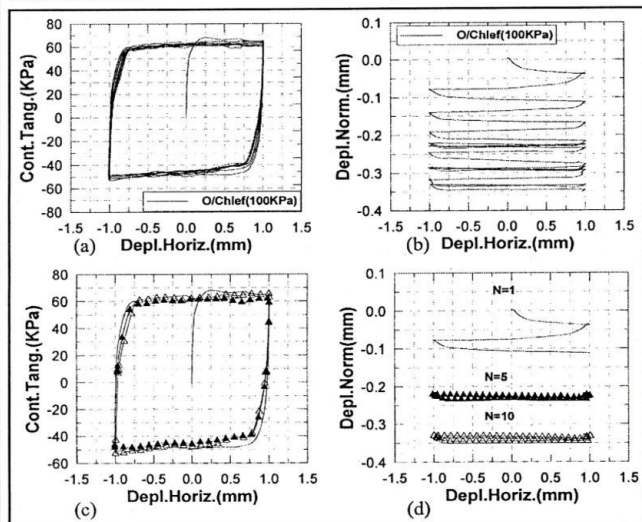


Figure-10 Essai cyclique à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq Y \leq +1 \text{ mm}$
 Sable de O/Chlef, surface lisse, $Dr = 90\%$
 (a, b: Evolution de τ et σ_v aux cours des cycles)
 (c, d: τ et σ_v aux cycles: 1, 5 et 10)

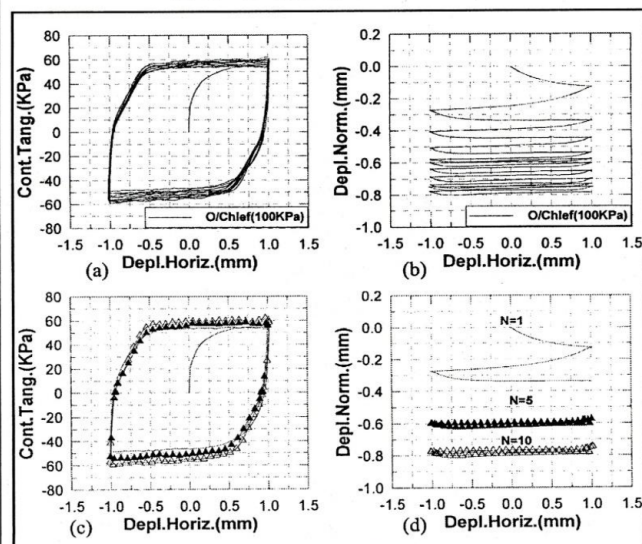


Figure-11 Essai cyclique à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq y \leq +1 \text{ mm}$
 Sable de O/Chlef, surface lisse, $Dr = 15\%$
 (a, b: Evolution de τ et σ_v aux cours des cycles)
 (c, d: τ et σ_v aux cycles: 1, 5 et 10)

5. CONCLUSION

Devant le manque d'essais cycliques d'interface, une partie

importante de ce travail a été consacrée à l'étude expérimentale du comportement cyclique de l'interface. Des essais ont été réalisés pour analyser l'influence sur ce comportement des principaux paramètres, à savoir : la densité du sable, la rugosité de l'interface; le niveau et la forme des cycles de chargement. Ces essais ont montré que la rugosité de la surface affecte d'une manière significative le comportement mécanique de l'interface. On note que l'érouissage cyclique (variation de la contrainte de cisaillement maximale) se stabilise plus rapidement dans le cas d'une surface lisse et que l'interface rugueuse induit un déplacement normal plus important. Ils ont montré également que le chargement cyclique induit un érouissage cyclique qui se traduit par un durcissement ou un radoucissement selon la densité du sable, la rugosité de l'interface et le niveau de chargement. Ils ont également mis en évidence que le comportement de l'interface est contractant, suivi par une légère phase de dilatance à chaque inversion du sens du chargement, et que le déplacement normal cumulé est contractant pour les surfaces lisses, rugueuses et les sables lâches et denses.

6. REFERENCES

[1] Belkhatir M. (2000) - « Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique » - Mémoire de Magister présenté à l'Université de Chlef.
 [2] Shahrour I. & Rezaie F. (1993) - « Etude en laboratoire du comportement d'interface sous chargements monotone et cyclique »- Sixième Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols appliquée, pp. 400-408.
 [3] Shahrour I. & Rezaie F. (1997)- « An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading »- Computers and Geotechnics, Vol.21, No.1, pp.21-39.