

# Modélisation expérimentale et numérique du comportement des interfaces sol-structure

B. BENCHEIK

*Maître de conférence ENS de Djelfa*

N. TALLAH

*Etudiant magister Université de M'sila*

**RESUME :** La résolution d'un problème d'interaction sol-structure (pieux, ouvrages souterraines, terre armée ;...) nécessite la connaissance du comportement des interfaces. Ce travail constitue une contribution dans ce sens. Il est composé de deux parties. Dans la première partie, nous présentons les résultats des essais de cisaillement monotones sol-structure réalisés avec le sable de Bou-saâda à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Dans la deuxième partie, le modèle d'interface MODJOIN est validé sur les essais réalisés dans la première partie. Ce modèle comporte les principaux concepts utilisés dans la modélisation des sols (écrouissage, état critique, ...). Les tests de validation ont montré que le modèle décrit bien le comportement de l'interface sous chargement monotone.

## INTRODUCTION

Le comportement des ouvrages en génie civil dépend en grande partie de celui des interfaces sol-structure. En effet, dans la littérature en géotechnique de ces trois dernières décennies une partie importante est consacrée au développement et à l'amélioration des techniques d'analyse du phénomène d'interaction sol-structure, on peut citer, comme exemple, les pieux sous chargement axial ou latéral, les fondations superficielles sous chargement latéral ou excentré et les ouvrages souterrains (murs, rideaux de palplanche, parois moulées, ...). Différentes techniques expérimentales ont été employées : Potyondy (1961), Wernik (1979), Yoshimi et Kishida (1981), Kishida et Uesugi (1987), Boulon (1989), Boulon et Nova (1990), Evgin et Fakharian (1996), pour étudier le comportement des interfaces sous chargements monotones et cycliques. Les résultats de ces études, ont permis de mieux comprendre le comportement des interfaces et d'en tenir compte dans le calcul et la conception des ouvrages en génie civil.

Le présent travail a pour objectif d'apporter une contribution à la modélisation du comportement des interfaces, sous chargement monotone. Une partie importante de ce travail est consacrée à l'étude expérimentale de ce comportement, utilisant une boîte de cisaillement direct et le sable de Bou-saâda, et au cours de laquelle plusieurs facteurs ont été étudiés tel que : la densité du sol, la surface de l'interface et le type de structure. Les résultats de ces essais ont servi par la suite à la validation du modèle MODJOIN destiné aux interfaces.

## 1 PARTIE I: ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

### 1.1 Dispositif expérimental utilisé et mode opératoire

#### 1.1.1 Description de l'appareillage

Des essais de cisaillement direct à contrainte normale constante ont été réalisés.

Dans les essais sol-structure la demi boîte inférieure a été remplacée par une plaque de surface rugueuse, ou lisse acier afin de mesurer les caractéristiques de l'interface (Figure 1-1).

Dans la suite on distingue uniquement deux surfaces: une surface lisse constituée d'une plaque d'acier et une interface rugueuse obtenue par collage des grains de sable sur la plaque d'acier.

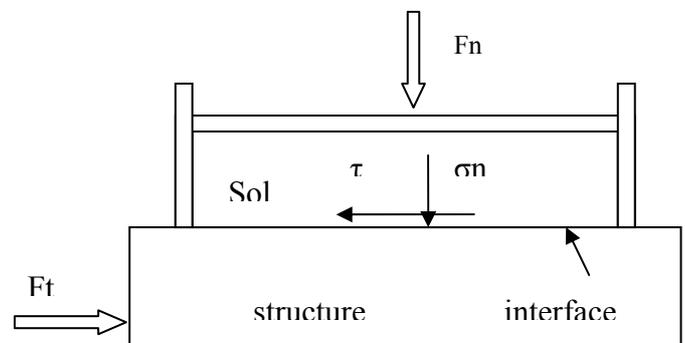


Figure : 1-1 Principe de la boîte de cisaillement direct

1.1.2 Mode opératoire

Le matériau est versé directement dans la boîte, On pèse une masse de sable que l'on compacte manuellement, dans la boîte par une dame en bois de même dimension que la boîte.

On procède généralement par couches jusqu'à une certaine hauteur qui donne le volume désiré.

On applique la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) et on procède au cisaillement à une vitesse de déplacement constante en mesurant l'évolution de la contrainte de cisaillement, du déplacement relatif normal ( $u$ ) et du déplacement relatif tangentiel ( $w$ ).

1.1.3 Matériaux étudiés

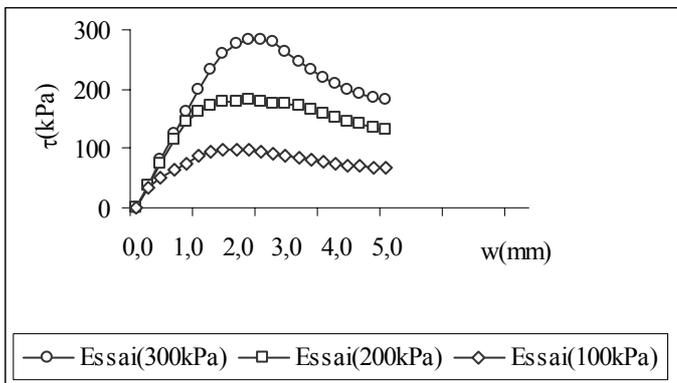
Les essais ont été réalisés avec le sable de Bou-sâada, c'est un sable de dune d'origine éolienne.

D'après l'analyse granulométrique qui est déterminé par tamisage, c'est un sable fin et homogène.

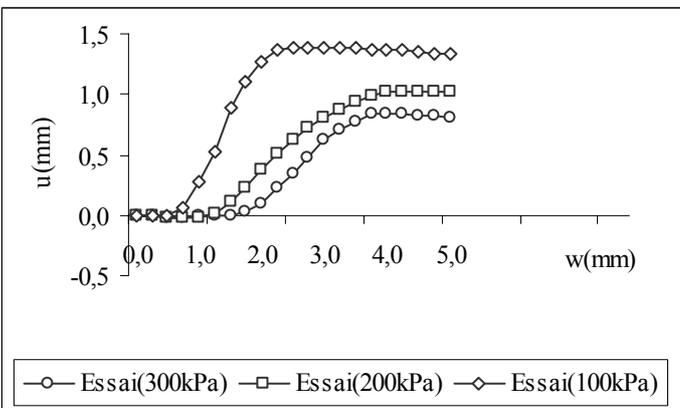
2 PARTIE II: PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS

2.1 Essais réalisés sur sable

Une série d'essais de cisaillement direct monotone a été réalisée pour étudier l'influence la densité initiale sur le comportement de l'interface sol-structure.

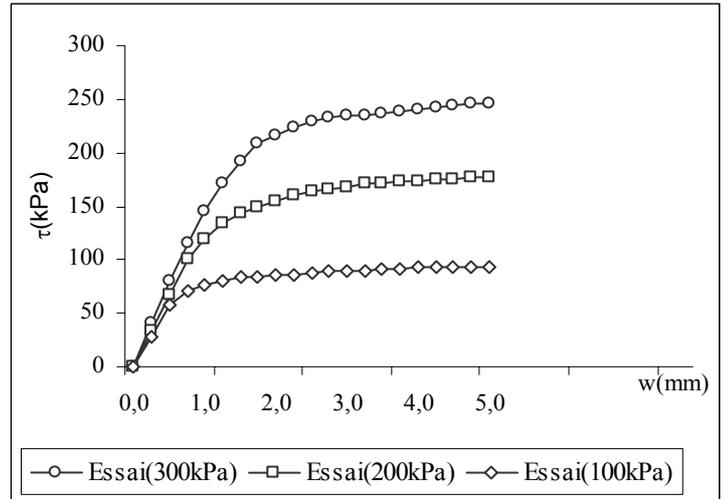


(a)

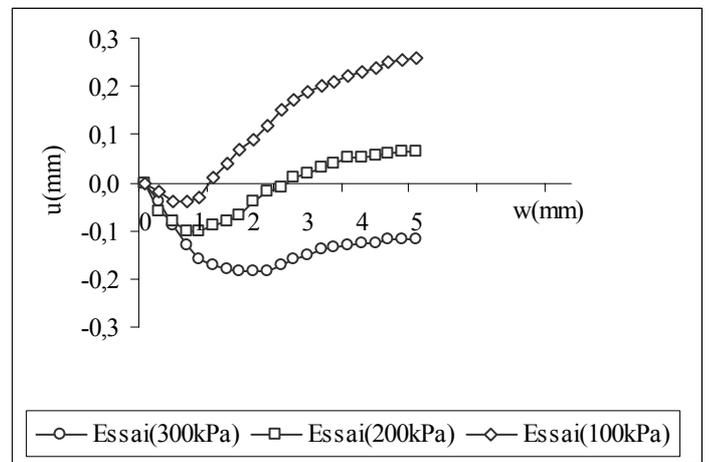


(b)

Figure : 2.1- Essais de cisaillement à contrainte normale Constante Surface rugueuse, sable de Bou-sâada dense ( $I_d = 90\%$ ). a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Evolution du déplacement normal



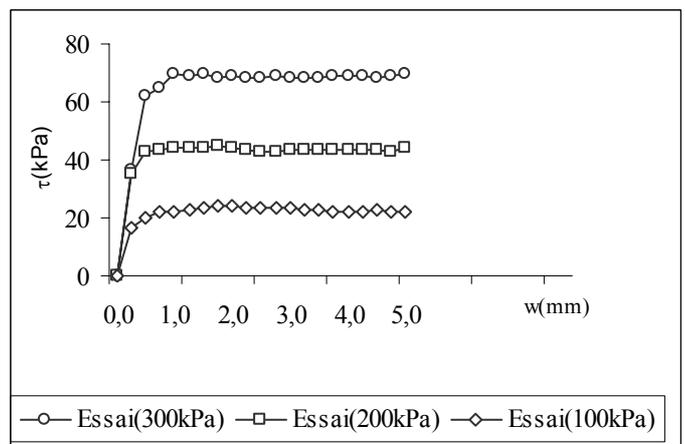
(a)



(b)

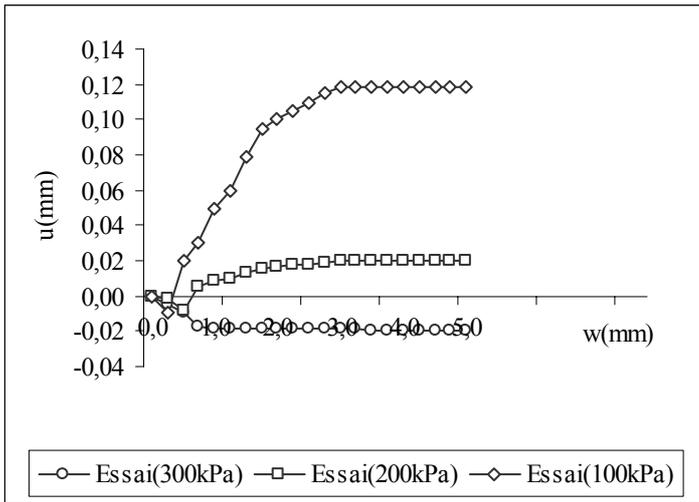
Figure : 2.2 Essais de cisaillement à contrainte normale constante Surface rugueuse, sable de Bou-sâada lâche ( $I_d = 15\%$ )

a: Evolution de la contrainte tangentielle  
b: Evaluation du déplacement normal



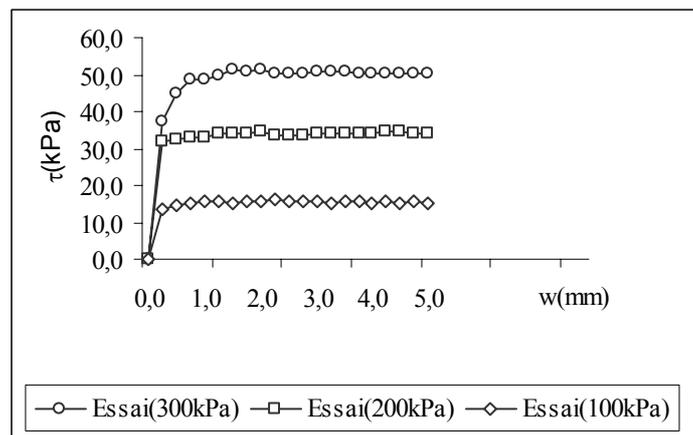
(a)

Figure : 2.3- Essais de cisaillement à contrainte normale constante Surface Acier lisse, sable de Bou-sâada dense ( $I_d = 90\%$ ) a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Evolution du déplacement normal

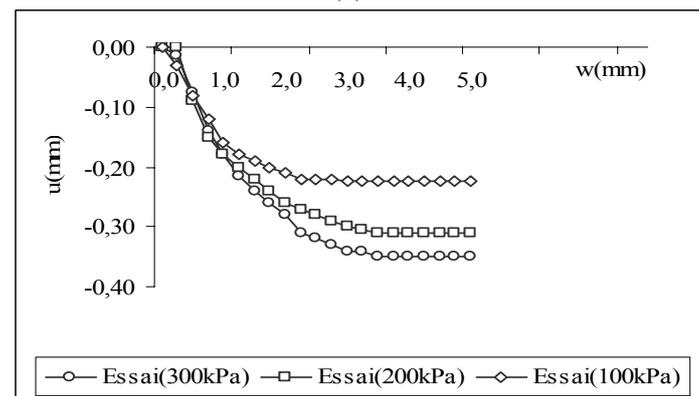


(b)

Figure : 2.3- Essais de cisaillement à contrainte normale constante  
Surface Acier lisse, sable de Bou-sâada dense ( $I_d = 90\%$ )  
b: Evolution du déplacement normal



(a)



(b)

Figure : 2.4 Essais de cisaillement à contrainte normale constante Surface rugueuse, sable de Bou-sâada lâche ( $I_d = 15\%$ )  
a: Evolution de la contrainte tangentielle b: Evaluation du déplacement normal.

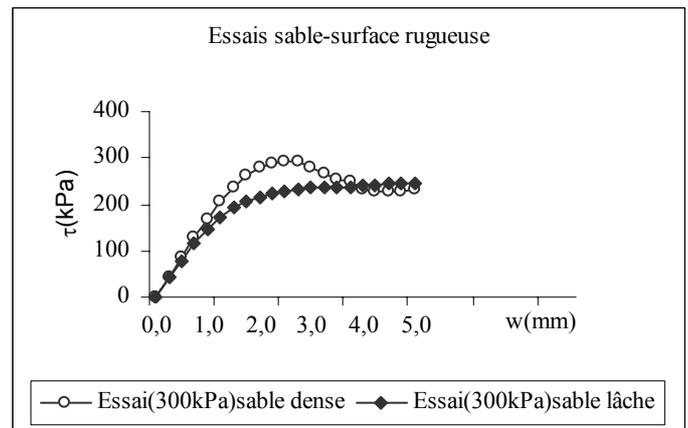
### 2.1.1 Effet de la Densité Initiale

Une analyse de ces résultats montre que le comportement de l'interface est très influencé par la densité initiale. On note que pour un sable dense, le comportement est dilatant avec radoucissement, alors que pour le sable lâche, l'interface est contractant tout au long, de chargement sans apparition de pic (Figures 2.5a à 2.6b). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Yoshimi et Kishida (1981) et Boulon (1991). On remarque aussi que:

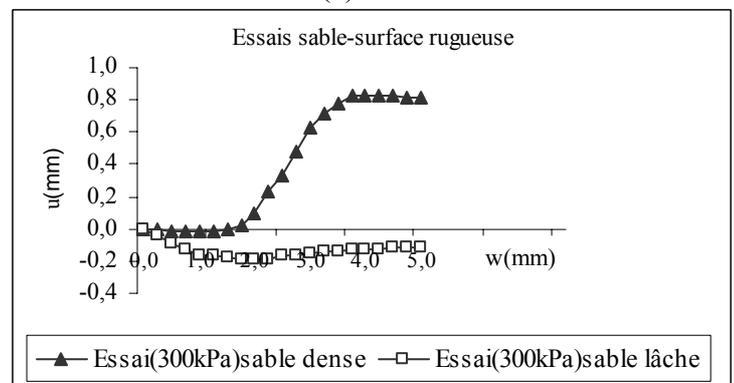
- La rugosité de l'interface modifie sensiblement son comportement; avec une surface lisse, on note un comportement de type élastique parfaitement plastique avec une légère variation du déplacement normal, alors qu'avec une surface rugueuse, on note un écrouissage important accompagné d'une forte variation du déplacement normal.

- L'angle de frottement interne diminue avec l'augmentation du confinement, en particulier dans le domaine des faibles contraintes.

- L'angle de dilatance est insensible à l'évolution du confinement pour les sables lâches alors qu'il diminue avec l'augmentation du confinement pour les sables denses.

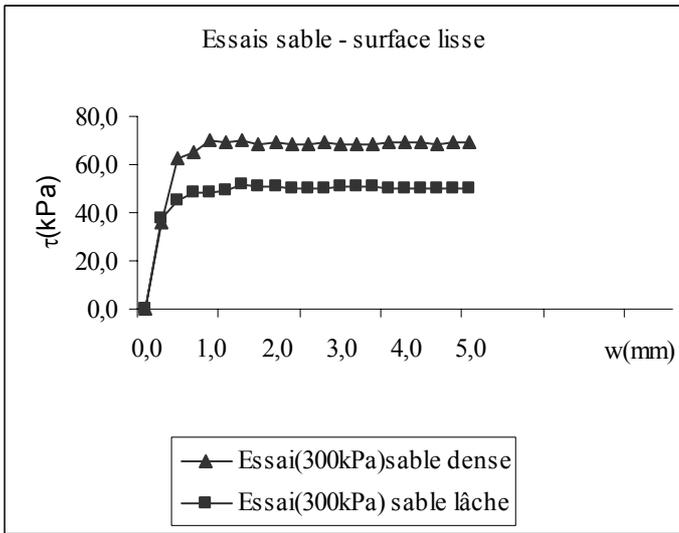


(a)

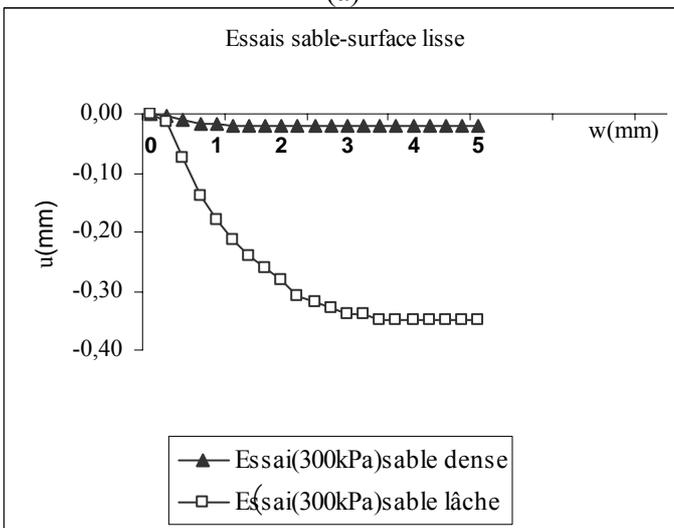


(b)

Figure : 2.5- Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable de Bou-sâada, surface rugueuse  
a: Evolution de la contrainte tangentielle  
b: Evolution du déplacement normal



(a)



(b)

Figure : 2.6- Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable de Bou-sâada, surface lisse  
 a: Évolution de la contrainte tangentielle  
 b: Evolution du déplacement normal

## 2.2 Présentation du modèle MODJOIN

Le modèle développé est basé sur l'élastoplasticité, l'incrément de déplacement relatif  $\Delta \varepsilon$  à l'interface est décomposé en une contribution élastique  $\Delta \varepsilon^e$  et une contribution plastique  $\Delta \varepsilon^p$ :

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^e + \Delta \varepsilon^p \quad (1)$$

Le développement d'une loi de comportement élastoplastique nécessite la formulation des expressions pour : le comportement élastique, la surface de charge, la règle d'écroutissage et d'écoulement plastique.

### 2.2.1 L'élasticité

Nous avons adopté pour les interfaces, un comportement élastique non linéaire, donné par les expressions suivantes:

$$k_n = k_{no} \left[ \frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{0.5}$$

$$k_t = k_{to} \left[ \frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{0.5} \quad (2)$$

Où :  $k_n$  et  $k_t$  sont respectivement le module normal et le module de cisaillement  $k_{no}$  et  $k_{to}$  représentent des constantes caractéristique de l'interface  $\sigma_n$  est la contrainte normale à l'interface et  $P_a$  est la pression atmosphérique

### 2.2.2 Le critère de rupture et la surface de charge

Le critère de rupture adopté est de type Mohr-Coulomb. L'équation de la surface de charge est obtenue en introduisant une fonction d'écroutissage

$$f_m(\sigma_n, \tau, \varepsilon_t^p) = |\tau| + \tan(\sigma_n + C)R_m \quad (3)$$

Où :  $C$  et  $\phi$  sont deux paramètres du modèle.

### 2.2.3 La règle d'écroutissage

La distorsion plastique  $\varepsilon_t^p$  est choisie comme paramètre d'écroutissage. Pour simuler le pic de contrainte et la phase de radoucissement, il faut associer à  $\varepsilon_t^p$  une fonction  $R_m$  qui passe par un maximum, puis elle décroît pour se stabiliser pour les grandes distorsions. On adopte alors, pour  $R_m$  l'expression suivante:

$$R_m = R_o + \frac{\alpha \varepsilon_t^p}{\beta \left( \frac{\sigma_{no}}{P_a} \right) + \varepsilon_t^p} + A (\varepsilon_t^p)^2 e^{-B \varepsilon_t^p} \quad (4)$$

Où :  $\alpha, \beta, A$  et  $B$  sont des paramètres du modèle.

$\sigma_{no}$  est la contrainte normale initiale

On note que  $R_m$  varie de  $R_o$  (fixant l'étendue du domaine élastique initiale) à  $R_o+1$  à la rupture

### 2.2.4 Règle d'écoulement plastique

L'incrément du déplacement relatif plastique dérive d'un potentiel plastique  $g$ . Pour tenir compte du concept d'état caractéristique, on a choisi :

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = 1 \quad \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} = \left( M_g - \frac{|\tau|}{\sigma_n} \right) x A_g \quad A_g = e^{-a_g \varepsilon_t^p} \quad (5)$$

Où :  $M_g$  et  $a_g$  sont deux paramètres du modèle.

Le modèle comprend donc, deux paramètres élastiques et huit paramètres plastiques. Ces

paramètres peuvent être déterminés à partir des essais de cisaillement direct.

On note que si on ne tient pas compte du pic, le nombre de paramètres plastiques se réduit à cinq.

### 2.3 Simulation des essais d'interface

Dans cette section modèle MODJOIN est utilisé pour la simulation des essais réalisés avec du sable de Bou-sâada et la plaque en acier.

Les paramètres du modèle ont été déterminés, les jeux de paramètres trouvés sont donnés dans le tableau 2.1. Nous allons, ci-après, présenter la reproduction des essais d'identification

#### 2.3.1 Sable dense

##### a) Surface Acier rugueuse:

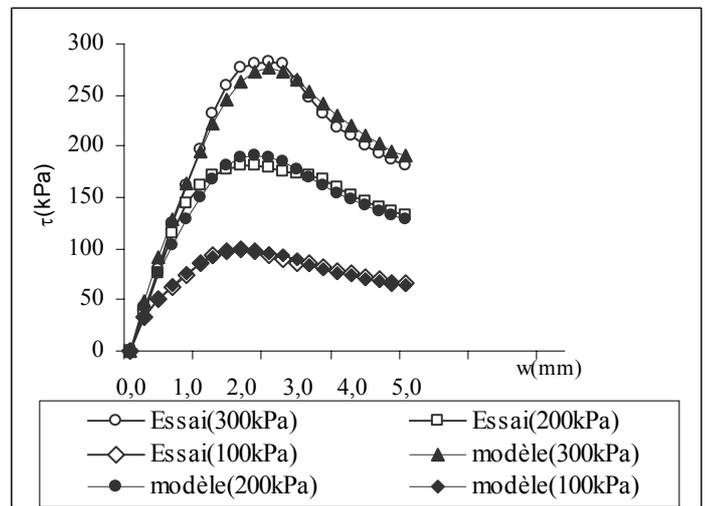
Les figures 2.7a et 2.7b montrent les résultats de simulation des trois essais à contrainte normale constante. On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement et reproduit bien le pic et le radoucissement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, le modèle décrit correctement la première partie de l'essai, mais, il ne produit pas la phase de contractance observée en fin d'essai surtout quantitativement.

##### b) Surface Acier lisse:

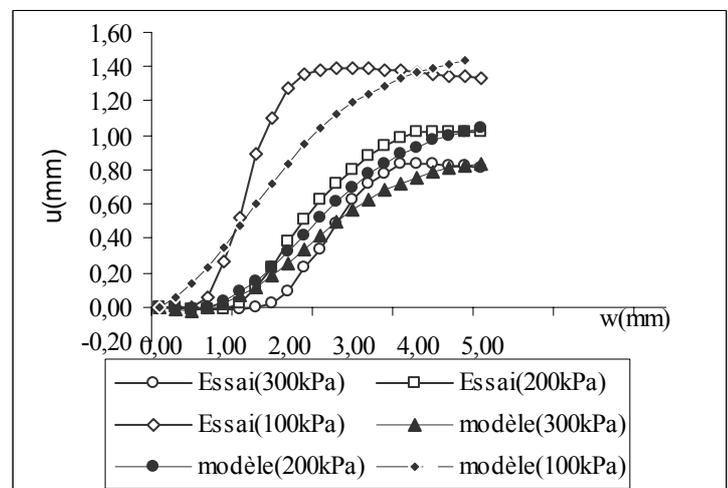
Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures 2.8a et 2.8b). On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement, pour le déplacement normal, on remarque que les prédictions du modèle sont sensibles à la contrainte normale initiale, ce qui induit un écart entre courbes expérimentales et de simulation

	ACIER RUG.90%	ACIER RUG.15%
$K_0(100\text{kPa}/\text{mm})$	4,00	4,00
$G_0(100\text{kPa}/\text{mm})$	2,00	2,00
$\phi(^{\circ})$	39 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$
$\alpha$	0,75	0,85
$\beta$	0,10	0,010
C	0	0
A	1,60	0,70
B	1,30	0,80
ag	0,50	0,85
$R_0$	0,20	0,20
$\psi(^{\circ})$	25 $^{\circ}$	37 $^{\circ}$

Figure : 2.1- Paramètres du modèle monotone déterminés à partir des essais à  $\sigma_n = \text{Cste}$



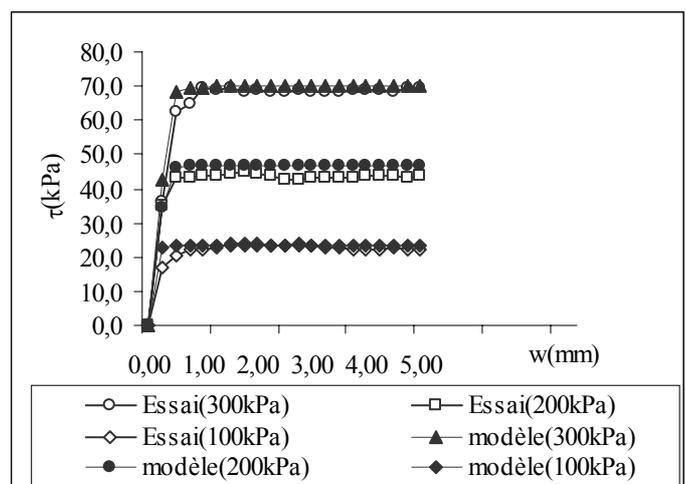
(a)



(b)

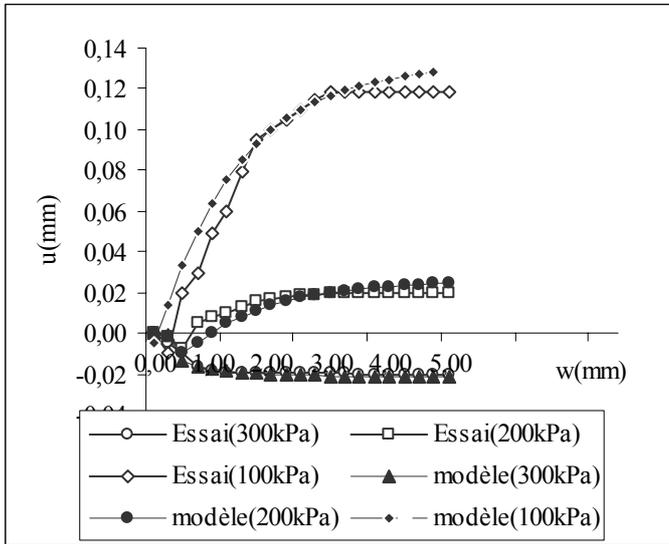
Figure : 2.7- Simulation des essais à contrainte normale constante

Sable de Bou-sâada dense ( $I_d = 90\%$ ), surface rugueuse Acier  
a : Evolution de la contrainte de cisaillement  
b : Evolution du déplacement normal



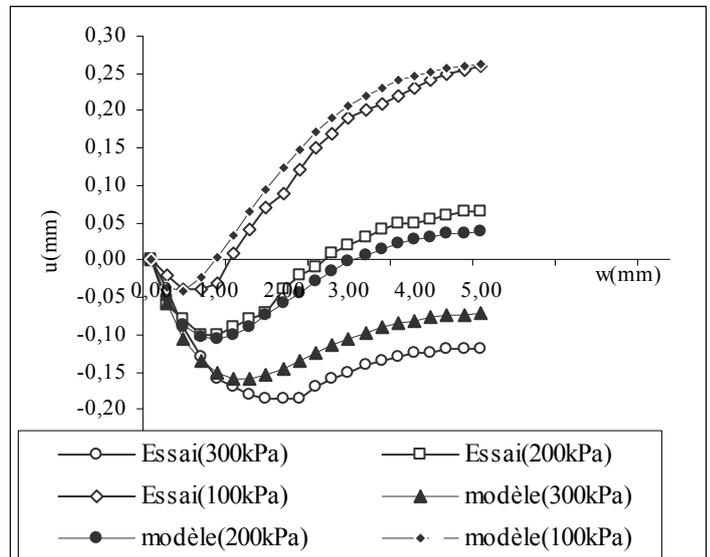
(a)

Figure : 2.8- Simulation des essais à contrainte normale constante Sable de Bou-sâada dense ( $I_d = 90\%$ ), surface lisse Acier a : Evolution de la contrainte de cisaillement



(b)

Figure : 2.8- Simulation des essais à contrainte normale constante Sable de Bou-sâada dense ( $I_d=90\%$ ), surface lisse Acier b : Evolution du déplacement normal



(b)

Figure : 2.9- Simulation des essais à contrainte normale constante Sable de Bou-sâada lâche ( $I_d=15\%$ ), surface Rugueuse.a : Evolution de la contrainte de cisaillement b : Evolution du déplacement normal

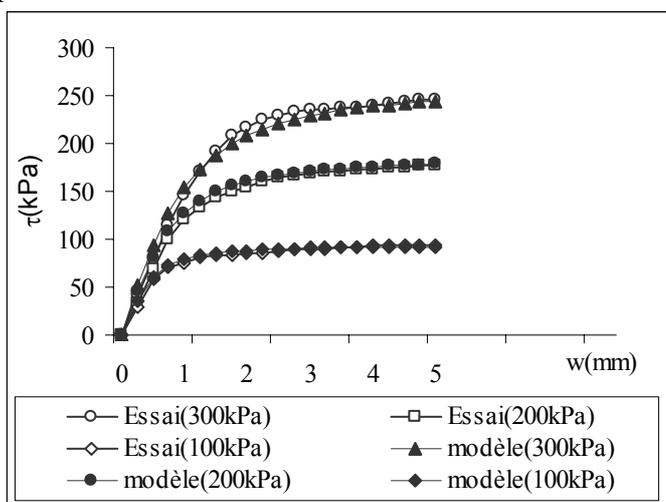
### 2.3.2 Sable lâche

#### a) Surface rugueuse Acier:

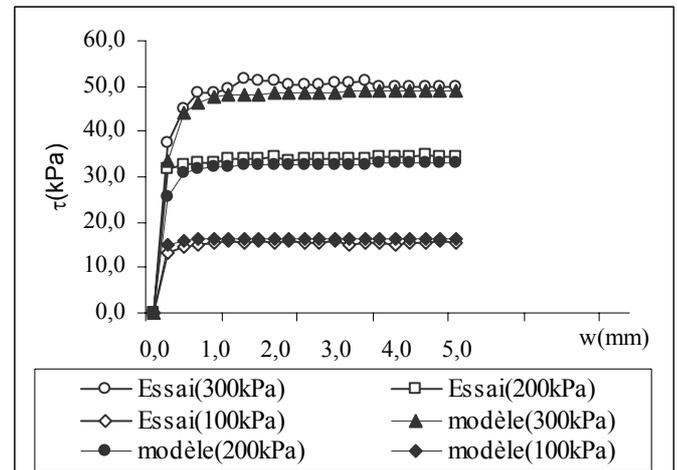
Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures 2.9a et 2.9b). On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on note que le modèle reproduit bien les essais.

#### b) Surface lisse Acier

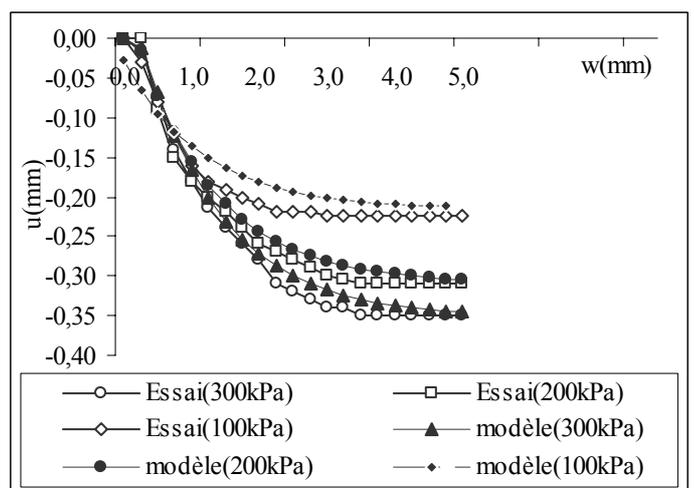
Les figures 2.10a et 2.10b montrent la simulation des essais utilisés pour déterminer les paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que le modèle reproduit bien ces essais en particulier celui réalisé avec 200 et 300 kPa.



(a)



(a)



(b)

Figure : 2.10- Simulation des essais à contrainte normale constante Sable de Bou-sâada lâche ( $I_d=15\%$ ), surface Rugueuse a : Evolution de la contrainte de cisaillement b : Evolution du déplacement normal

### 3 CONCLUSION

Les résultats de ces essais montrent qu'il y a une analogie entre le comportement des sols pulvérulents et celui des interfaces sol-structure (sable – structure rugueuse) et ont permis l'analyse de l'effet de certains paramètres tels que la densité relative, la rugosité et la contrainte normale initiale.

A partir des résultats de ces essais, les observations suivantes ont été faites :

- Le comportement de l'interface est très influencé par la densité initiale. On note que pour un sable dense, le comportement est dilatant avec un adoucissement, alors que pour le sable lâche, l'interface est contractante tout au long du chargement ; ces observations fournissent une idée sur les facteurs influençant le comportement d'interface sol-structure .

Ces essais ont servi aussi à la validation de la version monotone d'un modèle développé dans le laboratoire de mécanique de Lille pour l'interface sol-structure (Modjoin).

La simulation des essais de cisaillement à contrainte normale constante est satisfaisante. En effet le modèle décrit bien les principaux aspects du comportement de l'interface (plastification progressive, adoucissement, contractance-dilatance, et l'état critique en grands déplacements).

### 4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bencheik, B. & Tallah, N. 2008. Modélisation expérimentale et numérique du comportement des interfaces sol-structure . Mémoire de magister , C.U de Djelfa et Université de M'sila.
- PLYTAS, C. 1985. Contribution à l'étude expérimentale et numérique des interfaces sols granulaires-structures Application à la prévision du frottement latéral des pieux".Thèse D. I. Université de Grenoble, I.M.G.
- Rezaie , F. Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique. These de doctorat, Université des Sciences et technologies de Lille, 1994.
- Shahrour, I. & Bencheik, B. 1992. Analysis of the soil-structure interaction under monotonic and cyclic loadings. First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Bruxelles, Edition Ch Hirsch, O.C. Zienkiewicz and E. Onate : 269-275.
- 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: 400-408.
- Potyondy J.G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials: Geotechnique, 24, No. 4 : 339-353.
- Wernick. 1979. "A true direct shear apparatus to measure soil parameters of shear bands: Design Param. in Geotech. Eng. BGS. Vol. 2: 175-182.
- Yoshimi , Y. & Kishida , T. 1981. "A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces . Geotechnical testing Journal : GT JODJ, Vol. 4, No. 4 : 145-152.
- Uesugi M & Kishida H. Influential factors of friction between steel and dry sands. Soils and Foundations 1986,26(2):33–46.

- Boulon, M. 1989. Basic features of soil structure interface behavior. Comput. Geotech. 7: 115–131.
- Boulon, M. & Nova , R. 1990. Modelling of soil-structure interface behaviour- A comparison between elastoplastic and rate type model. Computer & Geotechnics Vol. 9: 21-46.
- Evgin, E. & Fakharian, K. 1996. Effect of stress paths on the behavior of sand-steel interfaces. Can. Geotech. J. 33: 853–865.