



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique

THEME

**Etude d'interface "sol-structure" sous
chargement monotone.**

Dirigé par :

Mr.KHemissa Mohamed professeur, Encadreur

.

Mr.Tallah Naoui, MCB, Co-Encadreur

Présenté par :

BEN BRAHIM

ZEYNEB

Promotion: 2018/2019



REMERCIEMENTS

Je ne remercie jamais assez Dieu, le tout puissant de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, nous remercions Mr. KHEMISSA M^{ed}, professeur à l'université de M'sila et Mr. TALLAH NAOUI MCB à l'université de M'sila qui ont bien voulu proposer le thème de master, pour son aide précieux, sa disponibilité durant toute la durée de notre projet.

Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

A tous nos enseignants à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci.

DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :
Mon cher père et ma chère mère qui m'ont
toujours soutenus durant toutes les périodes
de ma vie, que dieu le tout puissant les
protègent et les gardent.*

*Toute ma famille (Ben Brahim, zelghi,
Slimen et Ramdan)
Tous mes amis de promotion de master 2
classe de géotechnique 2018/2019 j'ai passé
avec vous des bons moments inoubliables
merci.*

*Mes encadreur Mrs : KHEMISSA
MOHAMED et TALLAH NAOUI.*

*Tous les enseignants de faculté de
technologie.*

Toute la promotion 2019.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Table des matières :

Sommaire	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1-2

Chapitre I

Étude bibliographique sur l'interaction sol-structures

Introduction :.....	4
I. Etude en laboratoire de l'interaction sol-structures :	4
<u>I.1.L'essai de cisaillement direct modifié</u> :.....	4
<u>I.2.L'essai de cisaillement direct simple</u> :	5
<u>I.2.1 L'appareil de cisaillement simple, type NGI (Norwegian Geotechnical Institute)</u> :	5
<u>I.3.Appareil de cisaillement axisymétrique (par arrachement)</u> :	6
<u>I.4. Modélisation de l'interaction sol-structure</u> :	6
<u>I.4.1. Comportement du matériau de la structure</u> :	6
<u>I.4.2 .Comportement des sols</u> :	6
<u>I.4.3.Comportement de l'interface</u> :	7
<u>I.5.1. Approche de type contact</u> :	7
<u>I.5.2. Approche de type couche mince</u> :	10
<u>I.6.Quelques exemples de l'interaction sol-structures</u> :.....	11
<u>I.6.1.Modélisation d'un bâtiment sur fondations superficielles</u> :.....	11
<u>1.6.2- Fondation superficielle construite à proximité d'un ouvrage souterrain</u> :	13
<u>1.6.3-Interaction sol-soutènement</u> :.....	14
<u>1.6.4-Interaction sol-tunnel</u> :.....	15
<u>I.7-Conclusion</u> :	16

Chapitre II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE

II. Introduction :.....	19
<u>II.1. Description du dispositif expérimental utilisé</u> :	19
<u>II.1.1. La plaque de béton</u> :.....	20
<u>II.1. 2.MATERIAUX ETUDIES</u> :	21
<u>II.2. Mode opératoire</u> :.....	23
<u>II.3Les essais d'identification</u> :	23

2.2.1 Le sable de dune:	23
Conclusion:	26

Chapitre III

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

III.PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS	28
III.1. ESSAIS REALISES SUR SABLE :	28
III.2. Surface sable-sable :	28
III.3. Surface lisse (béton) :	32
III.4. Surface rugueuse (béton):	35
III.5.Etude des angles de frottement et de dilatance :	39
III.6.Effet de la rugosité et de la densité initiale :	40
III.6.1. Effet de la Densité initiale :	40
III.6.2. Effet de la Rugosité:	41
III.7.CONCLUSION :	43

LISTES DES FIGURES

<u>Figure. I.1 : Principe de l'essai de cisaillement direct modifié.....</u>	5
<u>Figure. I.2: Principe de l'essai de cisaillement simple : type NGL.....</u>	5
<u>Figure I.3 : Appareil de cisaillement axisymétrique (par arrachement).....</u>	6
<u>Figure. I.4: Exemples des situations d'interface.....</u>	7
<u>Figure. I.5 : Elément joint de type Goodman.....</u>	8
<u>Figure. I.6 : Elément joint de type ressorts.....</u>	9
<u>Figure. I.7 : Modèle de Mohr-Coulomb.....</u>	10
<u>Figure. I.8 : Analyse du comportement d'un ouvrage simple :.....</u>	13
<u>Point de vue de la structure et point de vue du sol.....</u>	13
<u>Figure. I.9: Interaction entre une semelle filante et une cavité symbolisée par un cercle(En différentes positions) D'après Wood et Larnach (1985).....</u>	14
<u>Figure. I.10 : Analyse du comportement d'un écran de soutènement :.....</u>	15
<u>Point de vue de la structure et point de vue du sol.....</u>	15
<u>Figure II.1: Principe de la boîte de cisaillement direct.....</u>	19
<u>Figure II.2: Appareil de cisaillement direct.....</u>	20
<u>Figure II.3:surface lisse en béton.....</u>	20
<u>Figure II.4: surface rugueuse en béton.....</u>	21
<u>Figure .II.5: La barkhane.....</u>	22
<u>Figure .II.6 : Morphologie de la barkhane.....</u>	22
<u>Figure II.2.1 : le lieu où je prends le sable des dunes.....</u>	23
<u>FigureII.2.2 : essai de la masse volumique.....</u>	24
<u>FigureII.2.3: essai de l'équivalent de sable.....</u>	24
<u>Figure II.2.4: essai granulométrie du sable testé.....</u>	25
<u>Figure2.5: Courbe granulométrique du sable testé.....</u>	26
<u>Figure III.1: Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....</u>	29
<u>Surface sable-sable, sable des dunes (Id=15%).....</u>	29
<u>Figure III.2 : les résultats d'essai de cisaillement sable-sable lâche en Excel.....</u>	30
<u>Figure III.3 : les résultats d'essai de cisaillement sable-sable dense en Excel.....</u>	32
<u>Figure : III.4. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....</u>	32
<u>Surface sable-sable, sable des dunes (Id=90%).....</u>	32
<u>Figure III.5 : les résultats d'essai de cisaillement sable lâche –béton lisse en Excel.....</u>	33
<u>Figure III.6: Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....</u>	35

<u>Surface béton lisse, sable de dune (Id=15%).....</u>	35
<u>Figure III .7: les résultats d'essai de cisaillement sable dense –béton lisse en Excel.....</u>	36
<u>Figure III.8: Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....</u>	36
<u>Surface béton lisse, sable de dune (Id=90%).....</u>	36
<u>Figure III .9: les résultats d'essai de cisaillement sable lâche –béton rugueuse en Excel.....</u>	38
<u>Figure III .10: les résultats d'essai de cisaillement sable dense –béton rugueuse en Excel.....</u>	38
<u>Figure : III.11. Essais de cisaillement à contrainte normale constante</u>	40
<u>Surface béton rugueuse, sable de dunes (Id=15%).....</u>	40
<u>Figure : III 12. Essais de cisaillement à contrainte normale constant.....</u>	41
<u>Surface rugueuse (béton), sable des dunes (Id=90%)</u>	41
<u>Figure III.13: comparaison de l'influence de densité entre les essais sable-sable (lâche-dense) 200 Kpa.....</u>	43
<u>Figure III.14 : déplacement sable-sable (lâche –dense) 200 Kpa.....</u>	44
<u>Figure III.15 : comparaison de l'influence de la rugosité entre les essais sable lâche -béton (lisse – rugueuse) 200 Kpa.</u>	45
<u>Figure III.16 : déplacement sable lâche –béton (lisse-rugueuse) 200 Kpa.</u>	45
<u>Figure III.17 : comparaison de l'influence de la rugosité entre les essais sable dense -béton (lisse – rugueuse) 200 Kpa.</u>	46
<u>Figure III.18 : déplacement sable dense –béton (lisse-rugueuse) 200 Kpa.....</u>	46
<u>Figure III.16:Effet de la rugosité sur le comportement de l'interface</u>	47

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Analyse granulométrie.....25

Tableau III.1 : Evolution de l'angle de frottement ϕ en fonction de la contrainte de confinement σ_041

Tableau III.2 : Evolution de l'angle de dilatance ϕ en fonction de la contrainte de confinement σ_041

NOTATIONS

σ_n (kPa)	Contrainte normale
τ (kPa)	Contrainte de cisaillement
ε_n (mm)	Déplacement relatif normal
ε_t (mm)	Déplacement relatif tangentiel
U (mm)	Déplacement normal
W (mm)	Déplacement tangentiel
σ (-)	Vecteur des contraintes
ε (-)	Vecteur des déplacements relatifs
C (kPa)	Cohésion
Φ (degrés)	Angle de frottement
Ψ (degrés)	Angle de dilatance
σ_{no} (kPa)	Contrainte normale initiale

الملخص

حل مشكل تفاعل التربة مع الهياكل (أوتاد و هياكل تحت الأرض ارض مسلحة.....) يتطلب معرفة سلوك السطح البيئي هذا العمل هو إسهام في هذا الاتجاه.

سنقوم بتقديم نتائج التجارب تربة مع هيكل التي تم إجراؤها باستخدام مربع القص المباشر المعدل وأجريت هذه التجارب على مواد محلية (رمال واد ميطر المعاريف) في الضغط العمودي الثابت .

كلمات البحث. سطح بيئي, تربة مع هيكل, قص مباشر, رتبية, اللدونة

RÉSUMÉ:

La résolution d'un problème d'interaction sol-structure (pieux, ouvrages souterrains, terre armée ;.....) Nécessite la connaissance du comportement des interfaces.

Ce travail constitue une contribution dans ce sens.

Nous présentons les résultats des essais monotones sol-structure qui ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée, ces essais ont été réalisés sur un matériau local (sable d'oued miter-maarif) à contrainte normale constante à fort confinement, pour la structure on a utilisé du béton ayant différentes rugosités de surface.

Mots clés :

Interface; sol-structure ; appareil de cisaillement direct ; rugosité de surface ; plasticité.

ABSTRACT:

The resolution of a problem of interaction soil-structure (piles, works underground, reinforced earth;) requires the knowledge of the behavior of the interfaces. This work constitutes a contribution in this direction.

We present the results of monotonous tests of soil-structure which were realized by means of modified direct shearing box, these tests were realized on a local material (sand of oued miter -maarif) with constant normal stress, and strong confinement for the structure was used concrete having different surface roughness's.

Key words:

Interface, soil-structure; direct shear apparatus; surface rough (rigidity); plasticity.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

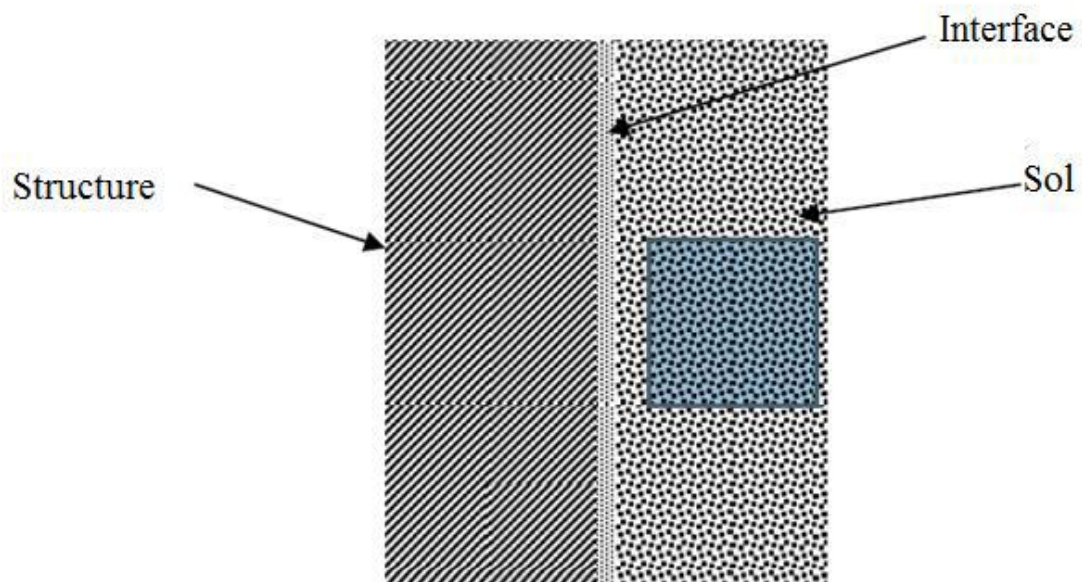
Le comportement des ouvrages en génie civil dépend en grande partie de celui des interfaces sol-structure. En effet, dans la littérature en géotechnique de ces trois dernières décennies une partie importante est consacrée au développement et amélioration des techniques d'analyse du phénomène d'interaction sol-structure, la transmission des efforts, de la structure vers le sol, se fait à travers une couche de sol en contact avec la structure appelée "interface".

Différentes techniques expérimentales ont été employées : Potyondy (1961) , Wernik (1979) , Kishida et Uesugi (1987) , Boulon (1989) , Boulon et Nova (1990) , Evgin et Fakharian (1996) , pour étudier le comportement des interfaces sous chargements monotones .Les résultats de ces études , ont permis de mieux comprendre le comportement des interfaces sol-structure et d'en tenir compte dans le calcul et la conception des ouvrages en génie civil.

❖ *Problématique :*

Un grand nombre de problèmes pratiques d'interaction sol-structure nécessite la connaissance de la résistance au cisaillement entre le sol et d'autres matériaux de construction.

L'interface entre un sol et une structure est une zone de cisaillement intense intéressant une épaisseur finie de matériau. Il a la particularité d'être placé à la frontière entre deux milieux de caractéristiques notablement différents et dont l'emplacement est connue.



Interface (épaisseur fine entre le sol et une structure)

INTRODUCTION GENERALE

La résistance de cisaillement à l'interface sol-structure est généralement différente de celle du sol lui-même. Elle dépend du matériau d'interface et de sa rugosité ainsi que des propriétés du sol, la granulométrie et la forme des particules du sol, l'amplitude de la contrainte normale et de la vitesse de cisaillement. En somme, elle dépend en même temps à des facteurs reliés à l'interface et au sol.

Beaucoup plus de recherches ont été réalisées pour étudier le cisaillement à l'interface entre les sables et des surfaces solides.

❖ *Objectifs de la recherche :*

Dans le cas de l'étude du cisaillement à l'interface entre les sables et des surfaces solides, la littérature est relativement abondante.

Les résultats de cisaillement entre le sable et des matériaux solides de différentes rigidités sont présentés. Les matériaux solides considérés sont le béton.

Des essais de cisaillement direct standard impliquant un cisaillement sol-sol ont été également conduits en plus des essais d'interface.

Pour conduire une étude significative sur les mécanismes fondamentaux Susceptibles contrôler le cisaillement à l'interface, il est nécessaire tout d'abord de Caractériser les matériaux impliqués (sable, béton).

L'étude s'est attachée premièrement d'indiquer une vue réaliste du mécanisme de cisaillement d'interface entre sable et surfaces solides.

En Plus permettre la détermination du l'angle de frottement Φ et cohésion c .

❖ *Plan de la thèse :*

Les travaux présentés dans ce mémoire à caractère théorique a pour but de caractériser le comportement mécanique de l'interface entre un milieu Granulaire et une structure rigide (béton) sous chargement monotone, et comprend trois chapitres :

Chapitre 1 :

Donne un aperçu général sur les interfaces et le comportement puis Préciser quelques appareils d'étude en laboratoire et les travaux de Modélisation des interfaces sol – structure.

Chapitre 2 : dispositif expérimental utilisé et mode opératoire.

Chapitre 3 : présentation des résultats des essais réalisés dans laboratoire.

Chapitre I :

**Synthèse bibliographique
sur l'interface sol-
structure.**

Introduction :

Tous les ouvrages de génie civil sont en contact avec des sols ou des roches : cette interaction peut être localisée, dans les fondations de bâtiment ou d'ouvrage d'art, plus complexe dans les soutènements, ou totale dans le cas des tunnels.

Les calculs de mécanique des sols ou des roches, qui utilisent la mécanique des milieux continus et la mécanique des solides, n'ont à priori que peu de ressemblances avec ceux de la résistance des matériaux, qui sert au calcul des structures et utilise une représentation des efforts internes par des torseurs (effort normal N , effort tranchant T et moment fléchissant M).

S'il est possible de combiner ces deux approches dans un même calcul, les calculs se font habituellement de façon séparée dans chaque milieu (terrain/structure), avec une représentation simplifiée des conditions d'interface.

I. Etude en laboratoire de l'interaction sol-structures :

L'approche de l'interface par un milieu fictif ou réel auquel on associe une loi de comportement nécessite des études expérimentales de caractérisation mécanique selon les types de matériaux en contact. Depuis le début de l'utilisation des éléments joints dans le calcul des structures, des appareils plus ou moins sophistiqués ont été conçus pour mieux décrire le comportement des interfaces.

La plupart des travaux expérimentaux développés dans ce cadre portent sur le cisaillement entre un sol et une structure (béton, acier, bois ... etc.). Ainsi, la boîte de cisaillement direct de Casa grande, modifiée [Potyondy, Wernicke, Plytas, Desai, ... etc.], fut le premier outil utilisé dans ce domaine. Or ce type d'appareils présente en effet plusieurs inconvénients. Citons par exemple les conditions aux limites imposées par les parois de la boîte ; elles n'imposent pas au sol une déformation uniforme. Pour éviter ces défauts, de nombreux chercheurs ont conçu de nouveaux appareils.

I.1.L'essai de cisaillement direct modifié :

L'essai de cisaillement direct modifié pour l'étude des interfaces sol-structures à mettre l'échantillon de sol dans une demi-boîte et à remplacer l'autre demi par une plaque rugueuse (acier, béton, bois, ... etc.).

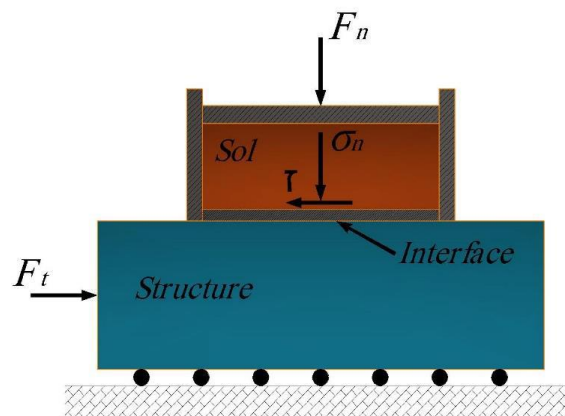


Figure. I.1 : Principe de l'essai de cisaillement direct modifié.

1.2.L'essai de cisaillement direct simple :

De conception semblable à l'essai de cisaillement direct, à quelques exceptions, Cet essai permet à l'échantillon de sol de se déformer librement et uniformément. La Différence par rapport au premier type d'essai porte essentiellement sur les conditions Aux limites appliquées au sol.

Dans ce cadre, deux types d'appareil ont été utilisés pour l'étude du cisaillement des interfaces.

1.2.1 L'appareil de cisaillement simple, type NGI (Norwegian Geotechnical Institute):

Conçu au départ par Bjerram et Lambva (1966) pour l'étude du Cisaillement dans les sols, il a été modifié par la suite par Budhu (1979) pour L'étude des interfaces (figure 1.2). La partie sol, de forme cylindrique, est Enfermée dans une membrane en caoutchouc renforcée par des spirales en acier, Empêchant toute déformation radiale de l'échantillon, ce qui permet à toute Section horizontale de rester circulaire pendant le cisaillement. L'interface entre le Sol et la plaque supérieure demeure ainsi circulaire.

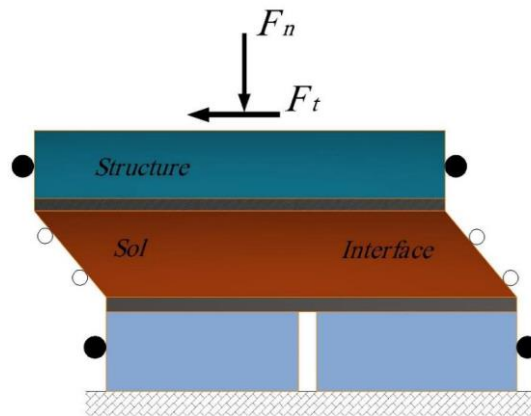


Figure. 1.2: Principe de l'essai de cisaillement simple : type NGI.

1.3.Appareil de cisaillement axisymétrique (par arrachement) :

Afin d'éviter les limitations des appareils conventionnels pour les essais d'interface, Brumund et Léonards (1973) ont développé un appareil spécial de cisaillement par arrachement permettant d'étudier le frottement entre le sable et un matériau de construction. L'échantillon de sable est cylindrique contenu dans une membrane en caoutchouc (Figure1.3) il est traversé par un cylindre en acier, en mortier ou en d'autres matériaux. L'appareil permettait de procéder à des mesures (statiques) et des mesures dynamiques en appliquant la force en **1 à 2 ms**.

Cet appareil a été créé afin d'essayer de modéliser le comportement d'un axe de pile et il permet d'atteindre du niveau des déplacements plus élevés. La préparation de L'échantillon pour ce type d'essai est compliquée, et il est difficile de commander et mesurer l'état de contrainte et de déformation à l'interface (Kishida et Uesugi1987).

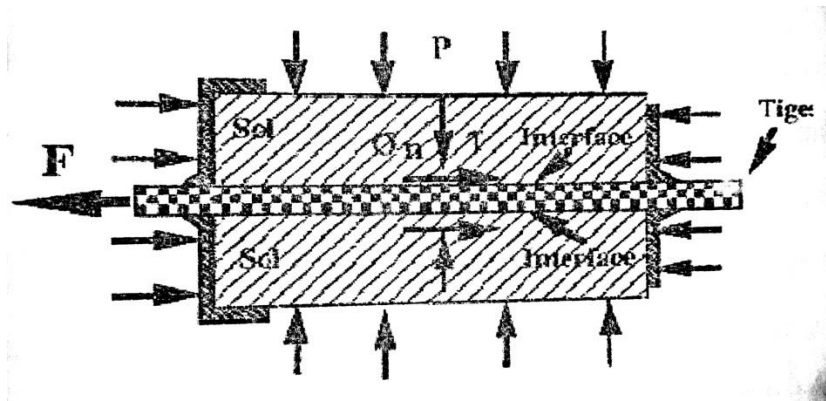


Figure I.3 : Appareil de cisaillement axisymétrique (par arrachement).

1.4. Modélisation de l'interaction sol-structure:

1.4.1. Comportement du matériau de la structure:

En général, la structure est constituée de matériaux (béton, acier, bois, ... etc.) dont la rigidité est beaucoup plus importante que celle du sol environnant. Le comportement de ces matériaux peut être décrit par des modèles simples, élastiques ou élastoplastique.

1.4.2. Comportement des sols:

Le comportement des sols est très complexe. En effet, il est essentiellement irréversible, non linéaire, dilatant et dépendant de l'histoire et de la direction des sollicitations. Pour de faibles sollicitations, il peut être décrit par l'élasticité linéaire. Pour des sollicitations moyennes ou fortes, des modèles plus élaborés ont été proposés : soit, des modèles élastoplastique avec ou sans écrouissage (Mohr-Coulomb, Lade, Cam-Clay, Nova, ... etc.), ou soit, des modèles incrémentaux (Duncan, Darve, Mroz, ..).

1.4.3. Comportement de l'interface:

Les interfaces sont généralement soumises à de fortes sollicitations de cisaillement. Leur comportement est essentiellement non linéaire. Les études proposées par différents auteurs appartiennent à l'une des deux approches principales suivantes :

1. Approche de type contact : dans ce cas, l'interface n'a pas d'épaisseur, elle est alors assimilée à un matériau fictif auquel on associe une loi de comportement reliant, en général, les contraintes et les déplacements relatifs à l'interaction.

2. Approche de type couche mince : dans cette approche, l'interface est constituée d'une zone de faible épaisseur. Ainsi, on adopte des lois de comportement rhéologique propres à ces zones.

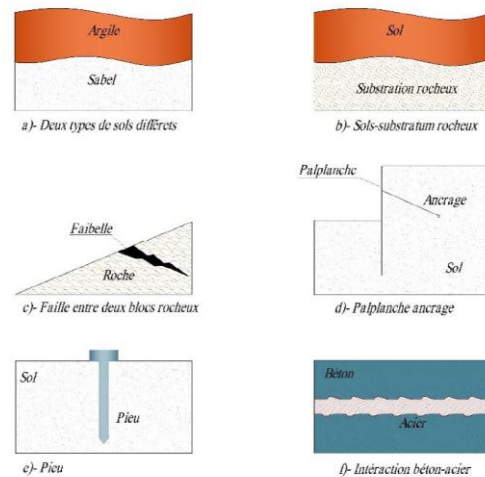


Figure. I.4: Exemples des situations d'interface.

1.5.Modélisation des interfaces:

Le traitement analytique des problèmes comporte des interfaces (interaction solstructures) pose beaucoup de difficultés théoriques et mathématiques. Et, si cetraitement est envisageable pour quelques configurations idéales, les solutions Correspondent rarement aux exigences pratiques.

Des méthodes numériques ont été développées pour apporter des solutionsapprochées à ce type de problèmes. La méthode des éléments finis est l'outil le plus utilisé dans Ce domaine.

Dans le cadre de cette méthode, des éléments spéciaux dits *éléments d'interface* Où *éléments joints* ont été développés pour le traitement des problèmes de contact entreDes milieux de même nature ou de nature différente.

1.5.1.Approche de type contact :

Cette approche a fait l'objet de nombreux travaux qui sont essentiellement basés Sur l'élément joint proposé par Goodman et al en 1968. Selon le type de loi deComportement et le type d'approche numérique utilisée, les études proposées dans ceCadre appartiennent à l'une des catégories suivantes:

- Adaptation de la rigidité. -Lois incrémentales.
- Lois élastoplastiques.
- Contact avec des conditions supplémentaires.

I.5.1.a)- Adaptation de la rigidité :
- Élément joint de type Goodman :

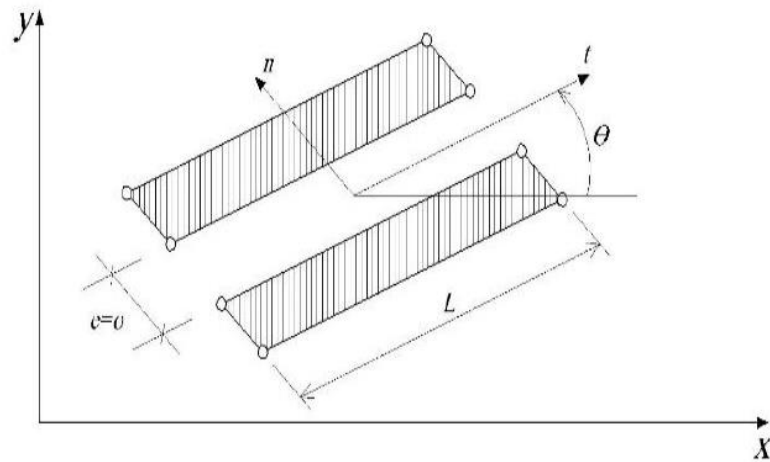


Figure. I.5: Élément joint de type Goodman.

Dans ce cas, l'élément joint est constitué de deux doublets de nœuds. Sa matrice De rigidité est formulée à partir de la minimisation de l'énergie potentielle, en Substituant les déformations à l'intérieur de l'élément par les déplacements relatifs à L'interface. Le vecteur de force de liaison $\{F\}$ par unité de longueur de l'élément est Donné

$$\{F\} = [K] \{\Delta U\} ;$$

$$\text{Avec : } \{F\} = \begin{Bmatrix} F_t \\ F_n \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{\Delta U\} = \begin{Bmatrix} \Delta U_t \\ \Delta U_n \end{Bmatrix}$$

La matrice de rigidité globale du système est obtenue par l'assemblage des termes Correspondant aux éléments rocheux et d'interface. Après la résolution du système D'équations régissant le problème, les contraintes de liaison sont calculées et la méthode d'adaptation de la rigidité est appliquée.

-Élément joint de type ressort :

L.R. Hermann a proposé des éléments de type ressort pour la modélisation du Comportement de l'interface acier-béton. Il a dédoublé les points de contact entre les Deux milieux, et a muni chaque doublet de nœuds de deux ressorts fictifs, Un tangentiel et un normal à la surface de contact (figure 1.6). Ces ressorts de rigidités Appropriées contrôlent le glissement et le décollement entre les corps en contact.

Le glissement est défini à l'aide du critère de rupture de Mohr-Coulomb, et la méthode d'adaptation de la rigidité est employée pour décrire le comportement de cet élément.

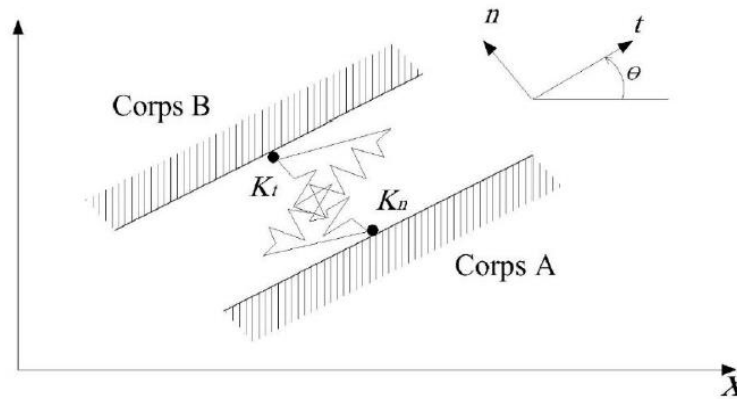


Figure. I.6: Élément joint de type ressorts.

Les forces de liaison F_n et F_t s'expriment par :

$$F_n = K_n \Delta U_n \text{ et } F_t = K_t \Delta U_t ;$$

1.5.1.b) Lois élastoplastique :

Y. Meimon et al ont utilisé, pour le calcul des fondations des plates-formes Pétrolières, des éléments joints à 6 nœuds. Le comportement à l'interface, dans le sens Tangentiel, est décrit par une loi élastoplastique non associée du type Mohr-Coulomb. Le glissement ou la plastification dans l'élément joint est donc gouverné par une Fonction de charge f et un potentiel plastique g :

$$f(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \tan \varphi - c ;$$

$$g(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \tan \psi$$

Où : φ , c et ψ sont respectivement l'angle de frottement, la cohésion et l'angle de Dilatance.

Ce modèle peut être représenté par une courbe de rupture, une courbe de Cisaillement élastique-parfaitement plastique, une courbe de compression-non traction et une courbe de dilatance, comme le montre les figures 1.9.a à 1.9.d.

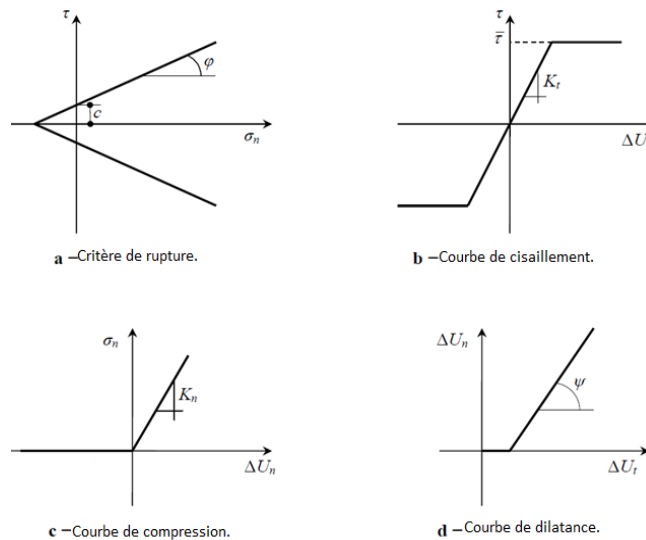


Figure. I.7: Modèle de Mohr-Coulomb

I.5.1.c) Lois incrémentales :

Les principaux travaux développés dans le cadre de cette approche sont ceux de L'équipe MASTEC de l'Institut de Mécanique de Grenoble. Les auteurs ont développé Une loi vectorielle bidimensionnelle à dépendance directionnelle pour le comportement De l'interface.

Leur modèle à été identifié sur des essais de cisaillement direct sol-structures, Selon trois chemins de sollicitations : à contrainte normale constante, à déformation Normale constante et à rigidité normale imposée.

I.5.1.d) Contact avec des conditions supplémentaires :

Ce type d'approche est fondé sur l'introduction des différentes conditions de Contact dans la formulation des éléments joints.

-Approche par la méthode de sous-structures :

J.M. Reynouard a mis au point un modèle de calcul pour les structures composées D'un ensemble de solides et dont les surfaces de contact sont évolutives. Le modèle Proposé consiste à utiliser, d'une part, une technique de sous structuration en chaîne Traduisant les conditions cinématiques, et d'autre part, un processus itératif qui traduit Les conditions statiques aux interfaces.

-Approche à l'aide du multiplicateur de Lagrange :

M.G. Katona a suivi la même démarche qu'Hermann et Frank en dédoublant les Nœuds sur la surface de contact. Mais dans son modèle, des conditions supplémentaires Sont introduites dans la formulation du système régissant le problème. Ces conditions Sont intégrées dans l'énergie potentielle à minimiser, à l'aide de la technique du Multiplication de Lagrange.

I.5.2. Approche de type couche mince :

Certains auteurs (Ghaboussi, Pandé, Desai) ont proposé l'introduction de la notion de déformations aux éléments joints ; ceci en assignant une certaine épaisseur l'interface. L'utilisateur de ce type d'éléments est justifié par le fait que la zone D'interface représente un domaine de faible épaisseur (cas des joints ou défauts remplis Dans les masses rocheuses et des zones d'interface sol-structures) qui est généralement Soumis à de fortes sollicitations de cisaillement. Ils ont alors adapté des lois de Comportement rhéologiques propres à ces zones.

J. Ghaboussi et al ont développé un élément joint avec une faible épaisseur (Comparée aux dimensions des éléments massifs adjacents) et ont présenté la Construction explicite de la matrice de rigidité de l'élément d'interface pour les Problèmes plans et axisymétriques.

G.N. Pande et K.G. Sharma, en s'inspirant des travaux de Zienkiewicz et de Ghaboussi, ont proposé un élément joint mince. Ils ont alors développé une formulation D'un élément iso paramétrique, parabolique à huit nœuds, en utilisant les déplacements Relatifs à l'interface Comme degré de liberté indépendante. Pour le comportement de L'interface, ils ont utilisé le modèle élastoplastique non associé de Mohr-Coulomb.

C.S. Desai a développé, pour l'élément couche mince, une loi de comportement Dans laquelle l'écroutissement et le pic de contrainte ont été introduits. Les paramètres de Ce

modèle sont déterminés à partir de l'essai de cisaillement direct entre un sol et une Plaque rugueuse en béton.

Le modèle a été appliqué à la prédiction du comportement d'un pieu dans une Argile, soumis à une charge de compression. Les résultats obtenus sont en bon accord Avec ceux de l'expérience.

I.6. Quelques exemples de l'interaction sol-structures :

I.6.1. Modélisation d'un bâtiment sur fondations superficielles:

La démarche de modélisation des interfaces peut être illustrée par l'exemple Simple d'un portique reposant par des fondations superficielles sur un massif de sol à Surface horizontale (figure 1.8).

a)-Calcul de la structure (Théorème de Winkler et Zimmermann) :

L'étude de la structure de l'ouvrage, qui utilise les outils de la résistance des Matériaux, a besoin de conditions aux limites au contact avec le sol (figure 1.10.b). Les Conditions les plus simples consistent en des conditions d'appui (appui simple, rotule, Encastrement) sur la surface du sol, supposée fixe. Ce type d'appui est suffisant pour L'étude des structures isostatiques, où les déformations (limitées) d'un appui Ne perturbent pas la répartition des efforts dans la structure. Pour les structures dont les Efforts internes dépendent des déformations (structures hyperstatique), il est Indispensable d'évaluer la réponse du sol sous les charges appliquées, en tenant compte= Du déplacement (et de la déformation) de l'interface. Ce besoin de faire varier l'effort de contact en fonction du déplacement a d'abord été traité dans un cadre linéaire, en Utilisable la théorie de Winkler et Zimmermann, parfois appelée *théorie de Déformations locales*, dans laquelle la force de contact F par unité de surface S est Proportionnelle au déplacement δ par un facteur k appelé *coefficient de réaction* et de Dimension [kN/m³]:

$$F/S = k \delta$$

Une variation de cette approche consiste à écrire localement la proportionnalité De la pression de contact p et du déplacement δ , ce qui permet de calculer les efforts Dans la fondation superficielle en tenant compte de la déformation de l'interface :

$$P = k \delta$$

Ultérieurement, pour améliorer la qualité de ce modèle de calcul en tenant compte De la limitation des pressions que peut supporter le sol, le modèle de Winkler a été Remplacé par un modèle *élastoplastique* de la forme :

$$\begin{cases} \delta = p/k \text{ pour } P < P_{max} \\ \delta \text{ quelconque pour } P = P_{max} \end{cases}$$

Dans laquelle la pression p_{\max} est le seuil de plasticité parfaite du sol. Différents Travaux ont été effectués pour intégrer des efforts de temps (consolidation, fluage) dans Ce modèle de calcul.

b)- Calcul du sol :

Pour le mécanicien des sols, le calcul de l'interaction sol-structure a une allure Toute différente : l'ouvrage est une condition à la limite appliquée au massif de sol (Figure 1.10.c), qui peut prendre deux formes principales :

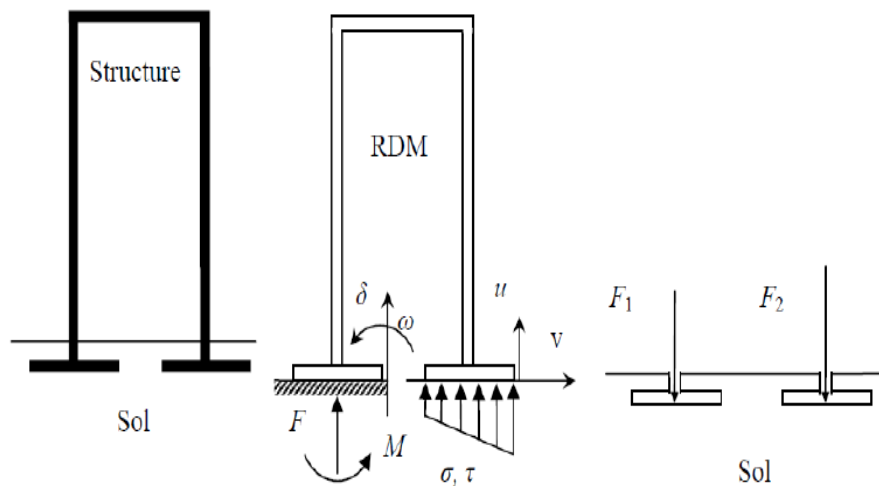
- ❖ pression uniforme sur une surface (fondation souple);
- ❖ force appliquée sur une surface à déformation uniforme (translation ou rotation)

Pour une fondation rigide.

Compte de tenu de cette condition d'interaction, qui tient compte du mode de Déformation de la structure (rigidités relatives du sol et de l'ouvrage), et des autres Conditions initiales et aux limites, on exécute alors les calculs classiques de stabilité et De déformation du massif de sol.

c)- Conclusion :

Chacun à leur façon, le calcul de la structure et le calcul du massif de sol Tiennent donc compte de façon détaillée de leur objet propre et, de façon plus Approximative, des propriétés de l'autre milieu. Les progrès récents de la modélisation Numérique des sols et des structures permettent en théorie de décrire simultanément de Façon égale le sol et la structure et de déterminer globalement les efforts et Les déformations de chaque matériau. Néanmoins, de tels calculs sont encore très rares Et il est important de garder à l'esprit que les calculs courants comportent une Description simplifiée de l'interaction.



A-Le sol structure b-Schéma de calcul de la structure
c-Schéma de calcul du sol

Figure. I.8: Analyse du comportement d'un ouvrage simple :
Point de vue de la structure et point de vue du sol.

1.6.2-Fondation superficielle construite à proximité d'un ouvrage souterrain :

Sous de nombreux sites existent des cavités naturelles, des anciennes carrières, Des canalisations, des galeries de mines ou encore des tunnels, ... etc. Les fondations Construites de tels sites posent donc des problèmes géotechniques particuliers.

De façon logique, la capacité portante du sol diminue lorsqu'une cavité est située Près de la fondation (figure 1.9). Des calculs par éléments finis en déformation plane Ont montré que cette influence disparaît lorsque la profondeur D (distance de la surface Au centre de la cavité) est supérieure à une profondeur critique, estimée à environ 5 fois Le diamètre de la cavité.

Lorsque la cavité est située au-dessus de la profondeur critique, la capacité Portante dépend de divers facteurs comme la géométrie de la fondation, Sa profondeur d'encastrement, la nature du sol et les dimensions, l'orientation et la Position de la cavité.

A partir de calculs aux éléments finis, Wood et Larnach (1985) ont ainsi décrit Une zone d'influence sur la capacité portante en fonction de la cavité sous la fondation : À l'intérieur de cette zone, La présence de la cavité affecte la capacité portante (figure 1.9). D'autres calculs par éléments finis ont mis évidence que la forme de la cavité (circulaire, carrée, rectangulaire ou hexagonale) à une influence relativement minime sur la capacité portante, pourvu que la surface globale de la cavité soit du même ordre de grandeur.

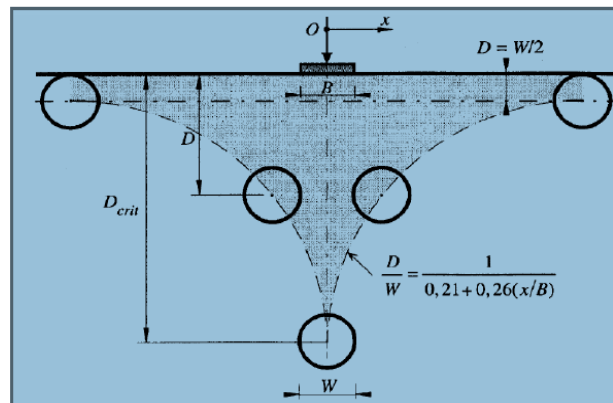


Figure. I.9: Interaction entre une semelle filante et une cavité symbolisée par un cercle(En différentes positions) D'après Wood et Larnach (1985)

1.6.3-Interaction sol-soutènement:

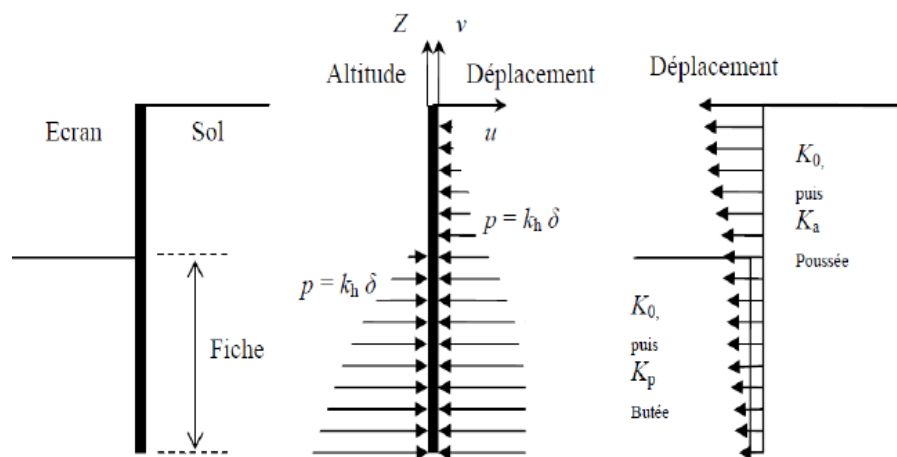
On peut faire des commentaires analogues sur le calcul des ouvrages de soutènement et, de façon générale, sur tous les calculs où du béton ou du métal sont en contact avec le sol. Ainsi, pour les rideaux de palplanches ou parois moulées devant lesquels une excavation est réalisée (figure 1.10.a), coexistent une approche de type calcul des structures et une approche de type mécanique des sols. Pour le calcul des structures, le sol en contact avec l'écran est réduit à un coefficient de réaction k (et, dans certains cas, une pression limite) (figure 1.10.b), ce qui permet de calculer les efforts (effort

tranchant, effort normal et moment fléchissant) dans la structure en fonction de k et des coefficients aux limites du problème. Le calcul se réduit alors à la résolution d'une équation différentielle du quatrième ordre du déplacement $u(z)$, de la forme :

$$\frac{d^4 u}{dz^4} = k \cdot (z) ; (1.14)$$

Que l'on résout pour des conditions aux limites adaptées (point fixe imposé par un tirant ou un butons, encastrement à la base ou en tête, ... etc.). Cette fois aussi, la pression de contact, dont on peut choisir l'inclinaison, peut être limitée aux pressions limites de poussée ou de butée, qui résultent de l'analyse du fonctionnement mécanique du massif de sol.

Si l'on aborde le calcul des écrans de soutènement du point de vue du sol, l'écran lui-même est traité comme une condition à la limite, qui se réduit en fait à une, hypothèse sur le sens de déplacement de l'écran par rapport au sol (figure 1.10.c). Cette hypothèse permet de définir les parties du sol en état de butée et en état de poussée et, moyennant une hypothèse sur l'inclinaison des forces de contact, de calculer les efforts Appliqués à l'écran par le sol. Ce calcul sert à vérifier l'équilibre général de l'écran, Indépendamment de son dimensionnement interne, à déterminer sa fiche et, si Nécessaire, à calculer la répartition des efforts dans l'écran.



a- Le sol et la structure b- Schéma de calcul de la structure

c - Schéma de calcul du sol-Structure

**Figure. I.10: Analyse du comportement d'un écran de soutènement :
Point de vue de la structure et point de vue du sol.**

L'idéal serait bien sûr de calculer simultanément les efforts et les déformations Dans le sol et dans l'écran, sous les charges de service, en recourant le moins possible Aux coefficients de réaction, qui ne sert pas des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols. Néanmoins, cette perspective reste éloignée et les deux approches de l'interaction sol-structure devront encore coexister en respectant les caractéristiques Essentielles de chacun des matériaux en contact.

Mouvement du sol autour d'une excavation:

la diminution des contraintes totales Pendant une excavation et la mise en place du soutènement entraînent des Mouvements du sol vers la fouille (déplacements latéraux généralement confinés par L'ouvrage), des tassements en surface derrière le soutènement, une déformation du Soutènement et un soulèvement du fond de fouille.

Les principaux facteurs qui affectent les mouvements d'un sol et de son système De soutènement sont, d'après Clough et Schmidt (1977) :

- ❖ La nature et les propriétés des sols;
- ❖ La forme et la profondeur de l'excavation;
- ❖ le type de soutènement, SA rigidité et son degré d'encastrement;
- ❖ La méthode de construction du soutènement, la durée et le phasage des travaux;
- ❖ L'intensité des surcharges d'exploitation et la présence de structures voisines;

1.6.4-Interaction sol-tunnel:

Le fonctionnement du soutènement (son niveau de chargement, notamment) Dépend de sa géométrie (forme, épaisseur), de ses caractéristiques mécaniques (Résistance, déformabilité, évolution dans le temps, comportement d'interface avec le Massif), des interactions entre les éléments qui le composent (joints, interaction entre Des voussoirs ou avec des renforcements), de sa vitesse de mise en place et de ses Conditions d'utilisation (effets thermiques, surcharges, interactions diverses avec L'environnement). Le mode d'interaction sol-soutènement-revêtement conditionne la loi de transmission des efforts normaux et tangentiels le long de la surface de contact. La rigidité du soutènement a notamment une influence importante sur leur intensité.

En fonction du chargement transmis au soutènement, quatre modes de fonctionnement peuvent être distingués.

- ❖ Travail en compression;
- ❖ Travail en flexion;
- ❖ Travail en membrane;
- ❖ Poinçonnement.

Les modes les plus courants sont les fonctionnements en compression et en Flexion. Les types de rupture sont essentiellement l'écrasement, le poinçonnement et la Fissuration (pour le béton projeté). Au niveau de la modélisation, trois hypothèses Différentes peuvent être faites concernant la nature du contact entre le sol et un Soutènement (contact longitudinal pour le béton projeté, contact radial pour des boulons

Ou des cintres) :

- ❖ Continuité complète du soutènement (ou du revêtement) et du massif.
- ❖ Glissement avec frottement ou glissement parfait, sans décollement du massif Par rapport au soutènement.
- ❖ Glissement avec frottement ou glissement parfait, ET décollement du massif par Rapport au soutènement.

Le choix est fait en fonction du problème traité (nature du terrain et du soutènement) et surtout de la connaissance de l'interaction. Si cette connaissance n'est Pas disponible, il

est d'usage de considérer les deux cas extrêmes : l'état collé (Continuité parfaite) et l'état de glissement parfait avec possibilité de décollement.

Chacune de ces hypothèses peut avoir une influence importante sur les résultats, car les contraintes et les déformations du soutènement dépendent surtout du mode de Construction adoptée. Bien que les conditions de calcul soient plus faciles dans le cas de L'adhérence parfaite, cette hypothèse correspond très rarement à la réalité du contact Entre le soutènement et le massif de sol ou de roche. Le frottement est en général Représenté par le critère de Coulomb, caractérisé par une cohésion et un angle de Frottement.

I.7-Conclusion:

A partir d'un état des lieux des appareillages actuellement disponibles en laboratoire, nous avons identifié les différentes approches possibles : cisaillement direct Où la surface de cisaillement reste imposée au cours de l'essai, cisaillement simple où le Cisaillement peut se développer librement au sein de l'échantillon. Le choix du chemin De cisaillement est également primordial pour pouvoir reproduire les phénomènes réels.

Les chemins à rigidité normale imposée (qui recouvrent les chemins à contrainte Normale constante et à volume constant) sont les plus appropriés, la raideur du système Pouvant être déterminée à partir du module préssiométrique du sol. L'influence de la Rugosité de la structure, de la densité et de la nature du sol et de la contrainte normale Initiale a été mise en évidence.

Cette synthèse bibliographique a permis de dresser un cahier des charges pour le Nouvel appareil qui fait l'objet de notre étude. Pour amener une évolution conséquente, Il devra satisfaire aux exigences suivantes :

- ❖ permettre de réaliser des essais selon tout type de chemin
- ❖ pourvoir supporter des contraintes importantes (jusqu'à 400 kPa).
- ❖ permettre de grands déplacements tangentiels d'interface sans perte de matériau.
- ❖ pouvoir réaliser des sollicitations monotones à vitesse contrôlée variable.
- ❖ permettre une visualisation du mouvement des grains au sein de l'échantillon.
- ❖ permettre l'utilisation d'un matériau relativement grossier.
- ❖ avoir une mesure locale de la contrainte normale au niveau de l'inter.

Chapitre II :

**Dispositif expérimentale utilisé et
mode opératoire suivi.**

II. Introduction:

Après description des matériaux utilisés et de la procédure d'essais suivie, ce chapitre donne la liste des essais de cisaillement direct sous charges monotones réalisés.

Deux matériaux ont été utilisés pour simuler l'interface sol-structure : un sable de dunes présentant deux formes de compacité, l'une dense et l'autre lâche, en contact avec une plaque de béton rigide présentant deux formes de rugosité l'une lisse et l'autre rugueuse.

Les essais de cisaillement direct ont été réalisés en utilisant une boîte de cisaillement comparable dans le principe à celle de Casa grande.

Le nombre et le type d'essais effectués ont été définis pour permettre d'étudier l'effet des principaux paramètres sur le comportement de l'interface sable-plaque : densité du sable, rugosité de la surface et contrainte de confinement.

II.1. Description du dispositif expérimental utilisé :

La boîte de cisaillement utilisée est semblable à celle de Casa grande. Elle est de forme cubique (6 cm de côté et 2.5 cm de profondeur) et constituée de deux demi-boîte (figure II.1) :

- une demi-boîte supérieure mobile remplie de sable ;
- une demi-boîte inférieure fixe remplie du même sable (dans les essais sable-sable) ou de la plaque de béton rigide (dans les essais sable-plaque).



Figure II.1: Principe de la boîte de cisaillement direct.

La demi-boîte supérieure est formée de deux parties: un cadre et un couvercle servant de piston pour l'application de l'effort normale. Cette disposition permet de mesurer le déplacement normal grâce à un comparateur, placé entre le piston et un point fixe.

- La course de déplacement est de l'ordre de 6mm.
- La boîte est garnie d'une pierre poreuse (parfois dentée) de façon à assurer un bon contact entre l'échantillon et la boîte.
- La partie inférieure est entraînée à vitesse constante, variable de 1.0 mm par minute.
- Un anneau dynamométrique lié à la boîte permet de mesurer l'effort de cisaillement.

- Un comparateur est placé entre la boîte mobile (inférieure) et un point fixe, la différence entre les lectures de ce comparateur et ceux de l'anneau dynamométrique, donne le déplacement tangentiel relatif de la boîte par rapport à la surface rugueuse ou lisse.

Pendant les essais un effort de compression constant est appliqué à l'échantillon à l'aide du poids figure [II.2].



Figure II.2: Appareil de cisaillement direct.

II.1.1. La plaque de béton:

On a utilisé une plaque de béton. J'étais couper un échantillon de béton sous forme cubique avec des dimensions (6cm.6cm. 1,5 cm), et sa Surface intérieure peut être lisse ou rugueuse pour simuler l'interaction sol-structure.

La surface lisse est obtenue par polissage (figure II.3), et la surface rugueuse par collage avec de l'ara dite des grains de sable sur celle-ci (figure II.4). Cette solution permet d'éviter tout contact entre les demi-boîte ce qui permet par la même occasion de l'amplitude des aspérités (c'est-à-dire le degré de rugosité), d'autant plus que la rupture s'effectue dans le sable et non pas dans le béton.



Figure II.3:surface lisse en béton.



Figure II.4: surface rugueuse en béton.

II.1. 2.MATERIAUX ETUDIÉS :

➤ SABLE DE DUNES :

A/- Mécanismes de formation :

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la Végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le Vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la Compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

B/- Types des dunes :

1. les avant-dunes (fore dune pour les anglophones), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou une avant dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles.

2. les falaises dunaires (dune Cliff pour les anglophones) n'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un Boisement qui a été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.

3. les dunes perchées, (Cliff-top dune pour les anglophones), qui apparaissent au sommet d'une falaise vive; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire. 4. les cordons dunaires artificiels, qui sont construits de main d'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradés rectifiées par des engins et fixées par des oyats à Sangatte dans le nord de la France.).

C/- Physique des dunes :

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les Étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert. Leurs Formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs Déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes.

Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris.

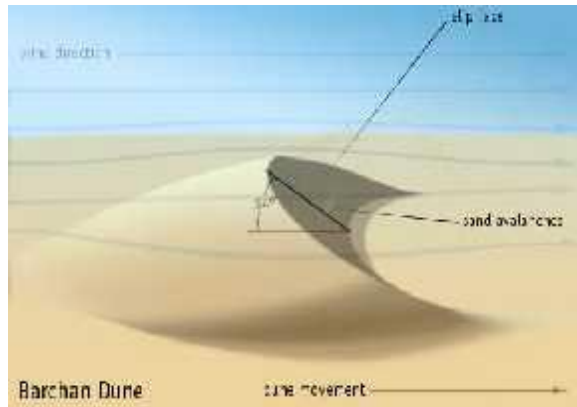


Figure .II.5: La barkhane.

Une barkhane est une dune de la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent, Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels. Le vent fait Rouler le sable pour qu'il remonte la pente du dos de la dune jusqu'à la crête et vienne Former de petites avalanches sur le versant plus pentu du front. Ce phénomène fait avancer la dune.

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de Barkhane (voir Fig. II5). Elles se forment dans des conditions particulières avec des Volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent (voir Fig. II.6).

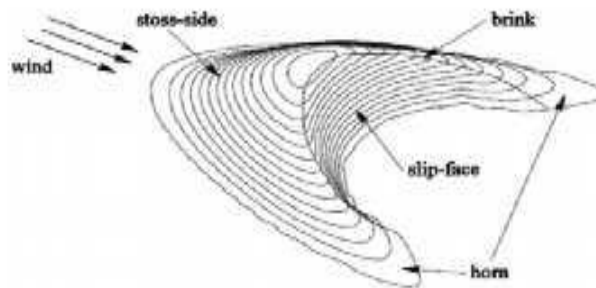


Figure .II.6 : Morphologie de la barkhane.

II.2. Mode opératoire :

Le mode opératoire comporte les étapes suivantes :

❖ Préparation de l'échantillon:

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.

Après la préparation de l'échantillon, on applique la contrainte normale souhaitée, Ensuite on monte les comparateurs de déplacement.

❖ Phase de cisaillement:

On applique la contrainte normale (σ_v) et on procède au cisaillement à une vitesse de Déplacement constante en mesurant l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ), du Déplacement relatif normal ou verticale (u) et du déplacement relatif tangentiel (w).

II.3 Les essais d'identification:

Deux matériaux ont été utilisés dans cette étude expérimentale pour caractériser l'interface sol-structure : un sable de dunes et une plaque de béton rigide. Ces deux matériaux sont décrits ci-après.

Le sable de dune:

On a réalisé ces essais avec le sable des dunes (oued Maiter El-maarif de m'sila).



Figure II.2.1 : le lieu où je prends le sable des dunes.

❖ Caractéristiques physiques:

Les résultats d'identification de ce sable suivant les normes française (AFNOR) donnent les caractéristiques suivantes:

- Poids volumique (γ_{dmin}) sec à l'état lâche : **13.9 KN/m³**

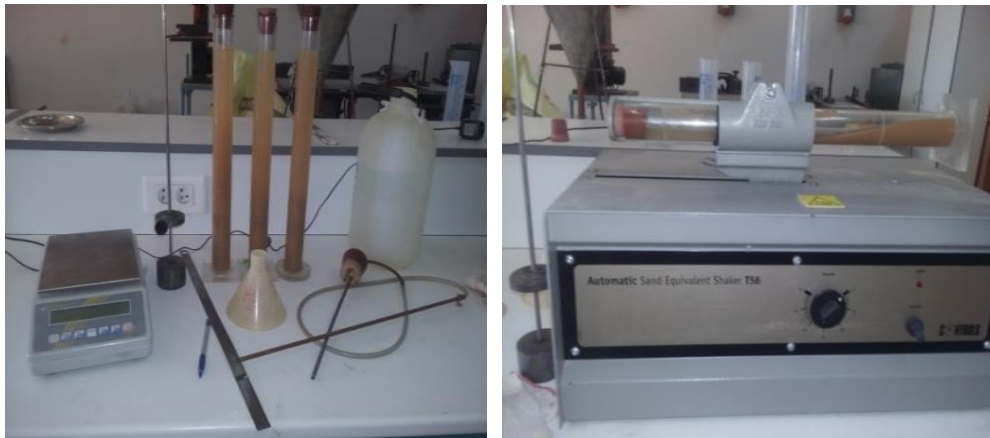
- Poids volumique (γ_{dmax}) sec à l'état dense : **17.2 KN/m³**

- Equivalent de sable E.S.V= **81.8%** (sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité).

- Equivalent de sable E.S.P= **75.45%** (sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité).



FigureII.2.2 : essai de la masse volumique.



FigureII.2.3: essai de l'équivalent de sable.

Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon, la distribution en poids des particules d'un granulat suivant leur dimension permet de déterminer sa continuité.

$$T=100 - R_c$$

Ou: **T**: Tamisât en (%)

R_c: Refus cumulés en (%).



Figure II.2.4: essai granulométrie du sable testé.

Tableau 2.1: Analyse granulométrie.

Tamis (mm):	Refus Partiel (g):	Refus cumulés (g):	Refus cumulés (%)	Tamisât (%):
1	0.5	0.5	0.03	99.97
0.4	9	9.5	0.63	99.37
0.315	65	74.5	4.97	95.03
0.2	317	391.5	26.1	73.9
0.16	753	1144.5	76.3	23.7
0.125	258	1402.5	93.5	6.5
0.1	49	1451.5	96.77	3.23
0.08	24	1475.5	98.37	1.63
Fond:	21	1496.5	99.76	0.24

Masse totale de l'essai= 1500g

L'analyse granulométrique effectuée par tamisage. Les résultats du tamisage à sec au travers de 07 tamis d'ouverture comprise entre 1 et 0.08 mm (Figure II.2.5) sont résumés dans le tableau 2-1, où **Cu** désigne le coefficient d'uniformité et **Cc** le coefficient de courbure.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} = 1.04 \quad ; \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 0.716$$

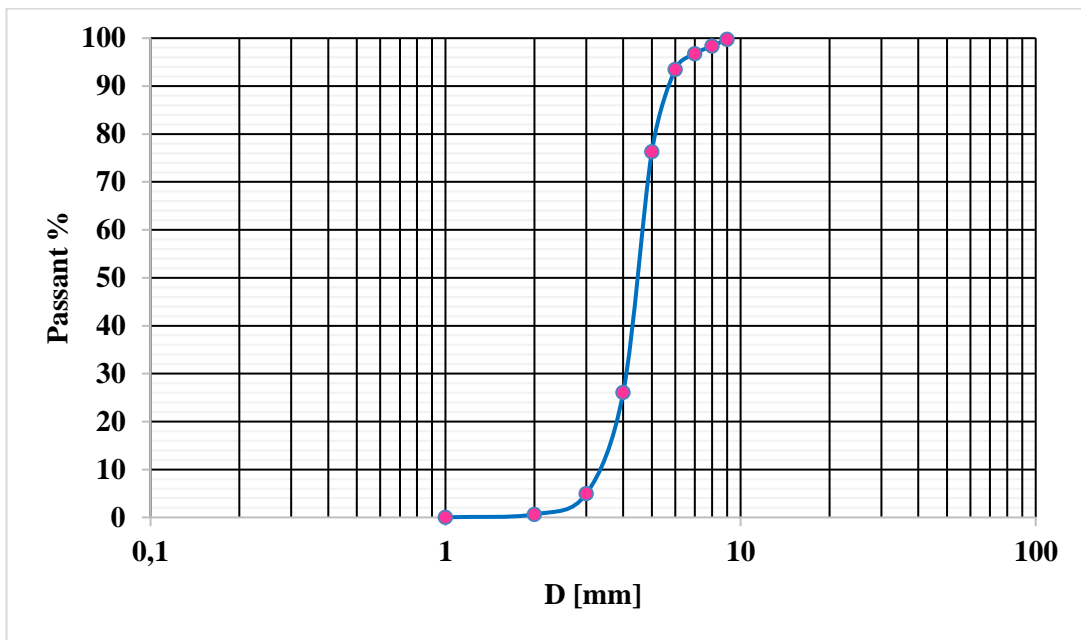


Figure2.5: Courbe granulométrique du sable testé.

Donc on constate que 88.53% de grains de sable de dune ont de diamètres entre 0.125mm et 0.315.

Conclusion:

Après la détermination des caractéristiques physiques du matériau que l'on va Étudier, on réalise une série d'essai de cisaillement direct modifié sur les interfaces sol structure (prochaine partie), ces essais ont permis l'étude de l'effet des principaux Paramètres sur le comportement de l'interface : type du sable (sable fin des dunes (oued miter El- maarif), rugosité de la surface de la structure (lisse ou rugueuse), densité du sable (Lâche ou dense), contrainte de confinement.

CHAPITRE III :

**Présentation des résultats
des essais réalisés.**

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES:

Cette partie est consacré à la présentation des résultats d'une série d'essai d'étude d'interface « sol-structure » sous chargements monotones, ces essais ont permis l'étude de l'effet des principaux paramètres sur le comportement de l'interface ; type du sable (sable fin oued miter –El maarif), rugosité de la surface de la structure (lisse ou rugueuse), densité du sable (lâche ou dense), contrainte de confinement, et enfin, la rigidité de plaque béton.

III.1. ESSAIS REALISES SUR SABLE :

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

Les essais ont été effectués par densités (lâche-dense) et deux types de deux surfaces : une surface lisse et une interface rugueuse obtenue par collage des grains de sable sur le béton et avec des essais d'interface sable-sable. Les essais ont été réalisés avec une série de chargement : à contrainte normale constante. Une gamme de contraintes de **(100 à 200 et 400 kPa)** a été explorée. Nous allons présenter ci-après, les résultats de différents essais.

III.2. Surface sable-sable :

❖ Sable lâche:

Des essais ont été effectués à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{no} = 100, 200 \text{ et } 400 \text{ kPa}$).

On constate que la contrainte de cisaillement croît au début de chargement jusqu'à un déplacement Tangentiel de l'ordre de (2.5 mm). Ensuite, elle continue à augmenter, mais modérément, sans atteindre de palier Figure [III.1a].

En ce qui dilatace le déplacement normal, Figure [III.1b], on note que le comportement du Sable est contractant au début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de (1.1mm) puis on remarque de stabilisation de ce déplacement, jusqu'à la fin de chargement.

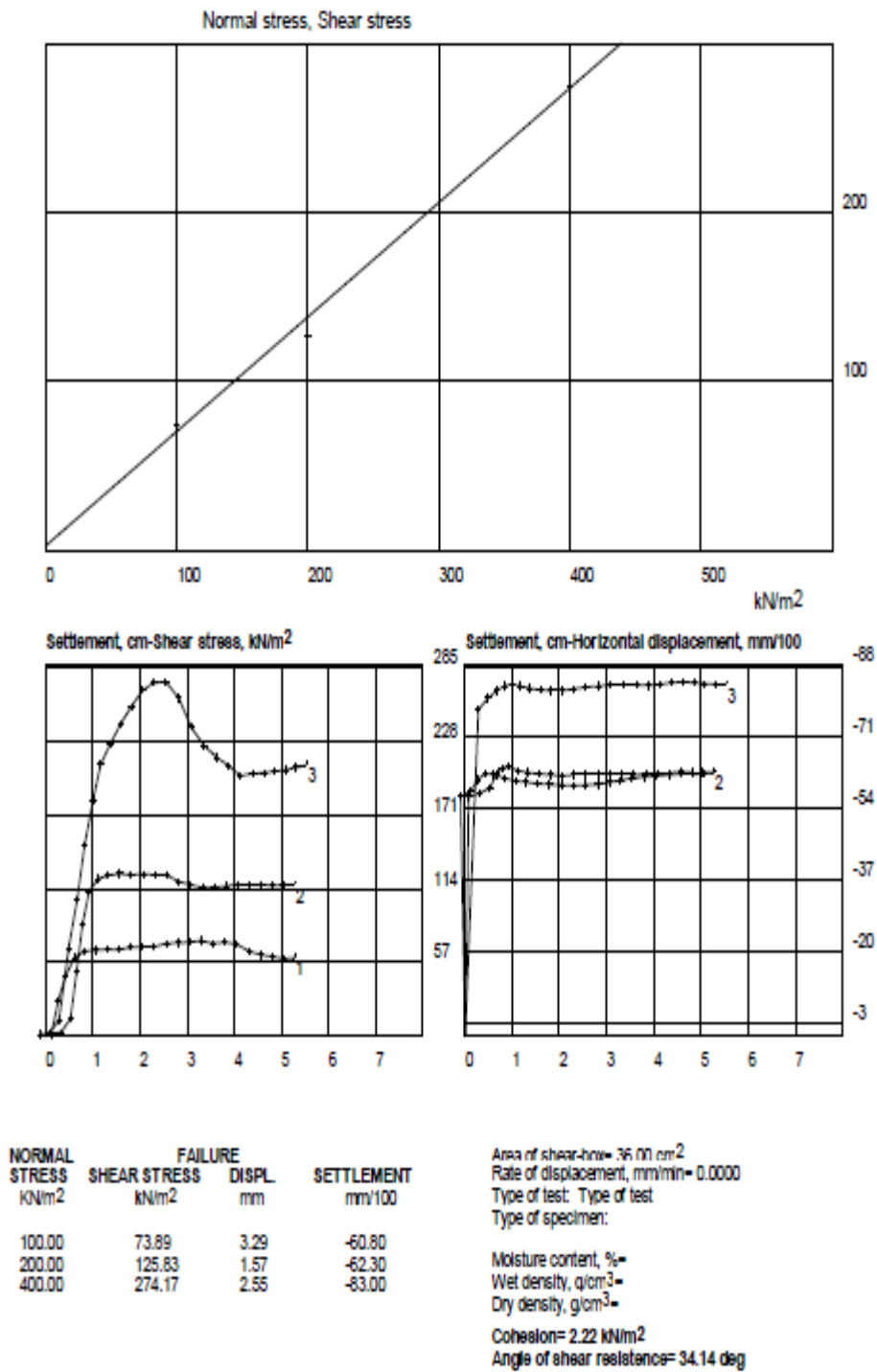


Figure III.1: Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface sable-sable, sable des dunes (I_d=15%)
a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal.

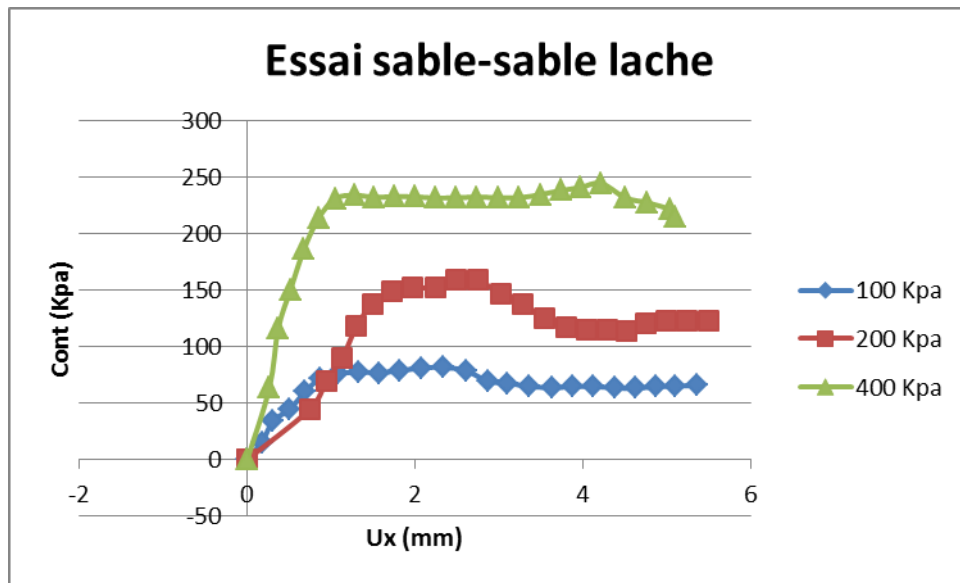


Figure III.2 : les résultats d'essai de cisaillement sable-sable lâche

❖ **Sable dense:**

Des essais ont été effectués à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{no}=100$ et 200 et 400 kPa).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (III.4a et III.4b). On constate que la contrainte de Cisaillement augmente au début du chargement pour Atteint un pic (t) pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 2.2 mm, après lequel, elle diminue pour se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 4.1mm L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la Figure (III.4b). On constate que le comportement au début de l'essai est contractant, ensuite, il devient dilatant (pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 1.5mm).

On note que le comportement du sable est contractant tout au long de l'essai et on n'observe pas de Stabilisation de ce déplacement (figure III.4b).

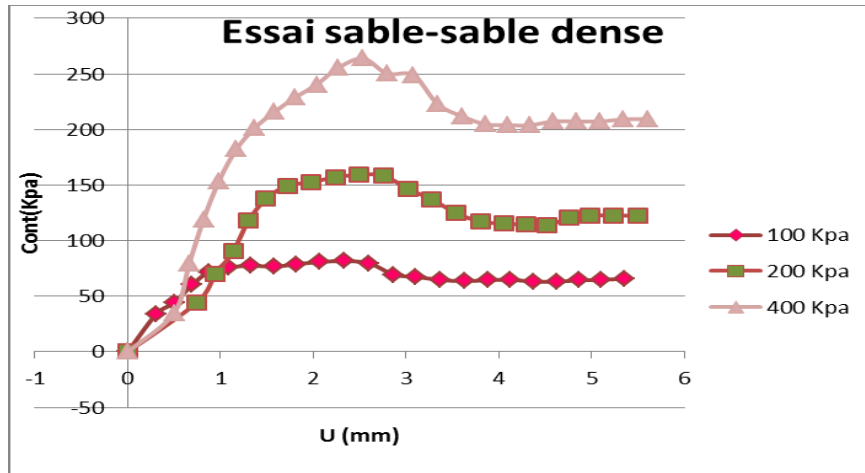


Figure III.3 : les résultats d'essai de cisaillement sable-sable dense

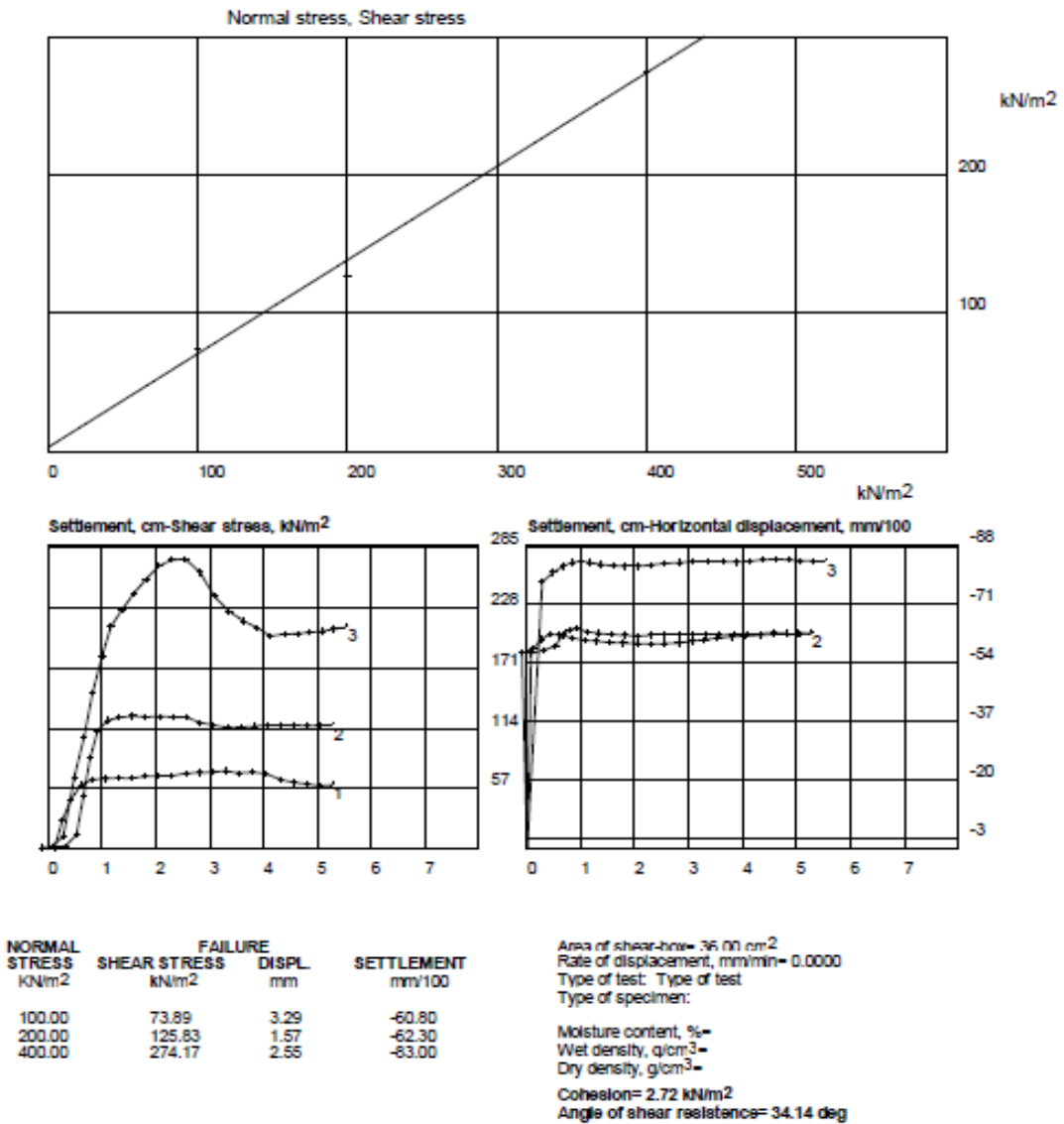


Figure : III.4. Essais de cisaillement à contrainte normale constante
 Surface sable-sable, sable des dunes ($I_d=90\%$)
 a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal.

III.3. Surface lisse (béton) :

Sable lâche :

Des essais ont été effectués à différentes valeurs avec le sable lâche à des charges monotones de la contrainte normale initiale (σ_{no} = 100 et 200 et 400 kPa).

Une analyse des résultats obtenus (Figures III.6a) montre que la contrainte de cisaillement croît au début de l'essai pour atteindre un palier, puis on remarque de stabilisation de ce déplacement de l'ordre de (4.1 mm), jusqu'à la fin de chargement.

En ce qui concerne le déplacement normal (Figure III.6b), on note que le comportement du sable est contractant le long de tous les essais et on observe de stabilisation de ce déplacement, jusqu'à la fin de chargement dans le cas du 400 kPa, (pour un déplacement normal de l'ordre de (2.9 mm)).

Sable dense :

Nous avons effectué des essais à trois valeurs avec le sable dense à forte confinement de la contrainte normale initiale (σ_{no} = 100 et 200 et 400 kPa).

Les résultats sont illustrés dans les figures (III.8a et III.8b.) On constate que la contrainte tangentielle croît faiblement au début du chargement pour atteindre un palier, puis, elle se stabilise à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de (1.8mm) jusqu'a la fin de chargement (Figure III.8a).

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on note que le comportement du sable est contractant au début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de (2mm) puis on remarque de stabilisation de ce déplacement, jusqu'a la fin de chargement (Figure III.8b).

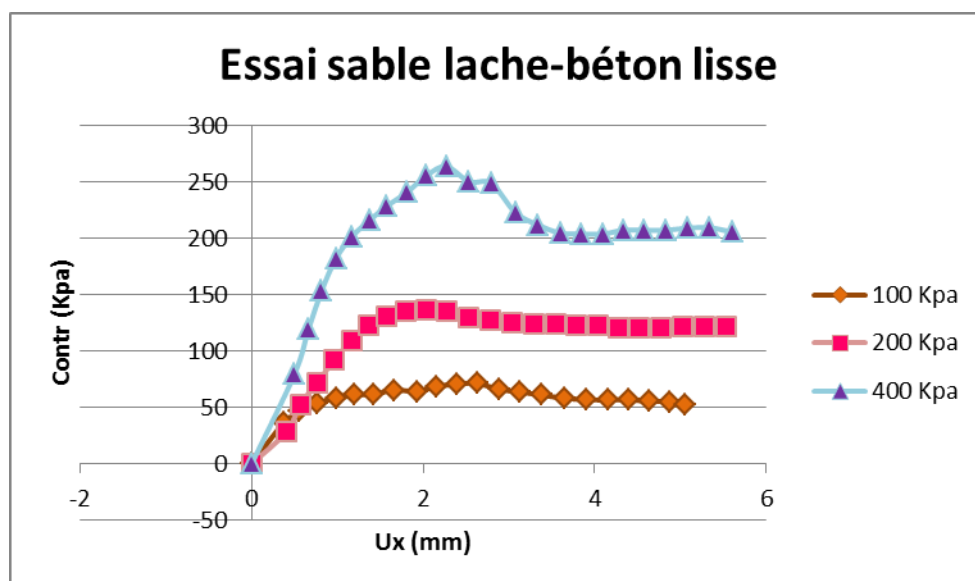
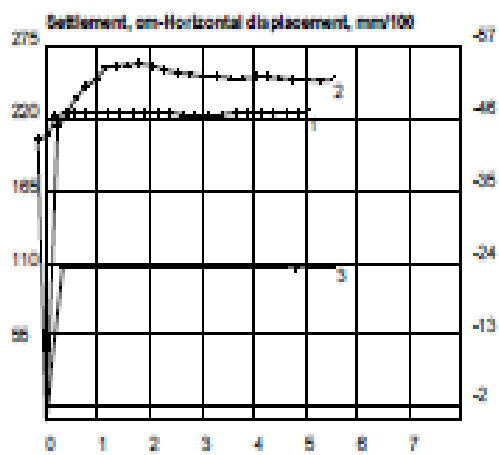
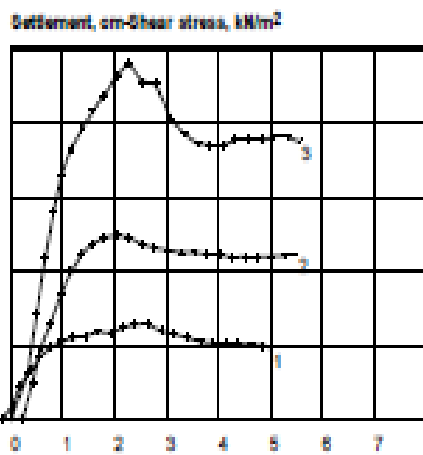
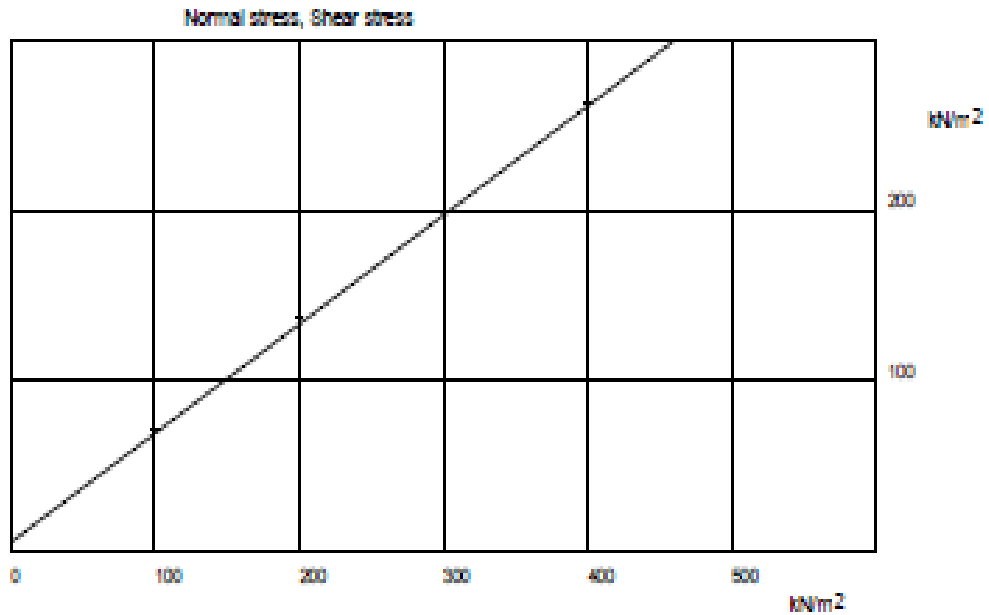


Figure III.5 : les résultats d'essai de cisaillement sable lâche –béton lisse

Direct shear test Type of test



NORMAL STRESS kN/m ²	FAILURE			Area of shear-box= 38.00 cm ² Rate of displacement: mm/min= 0.0000 Type of test: Type of test Type of specimen:
	SHEAR STRESS kN/m ²	DISPL mm	SETTLEMENT mm/100	
100.00	71.11	2.84	-48.70	Moisture content, %= Wet density, g/cm ³ = Dry density, g/cm ³ = Cohesion= 8.14 kN/m ² Angle of shear resistance= 32.88 deg
200.00	138.04	2.04	-54.10	
400.00	263.89	2.27	-23.50	

NOTE:

DATE:

Technician

Responsible

Figure III.6: Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface béton lisse, sable de dune (I_d=15%)
a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal.

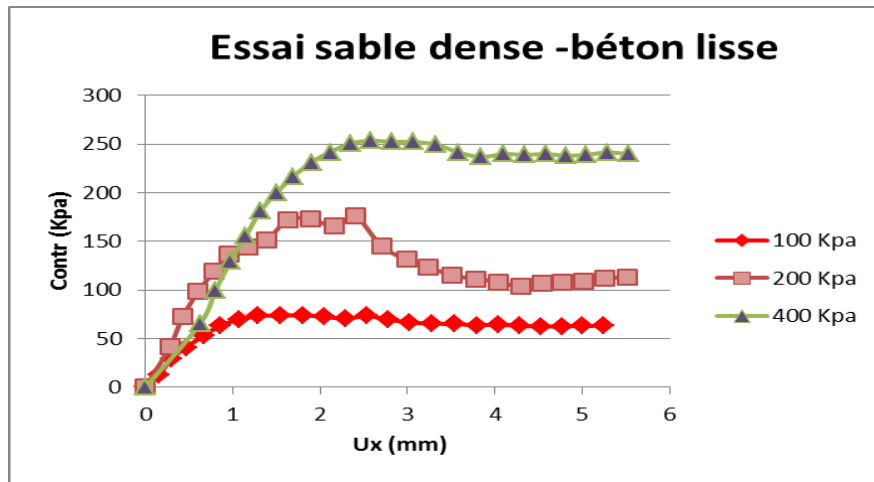


Figure III .7: les résultats d’essai de cisaillement sable dense –béton lisse

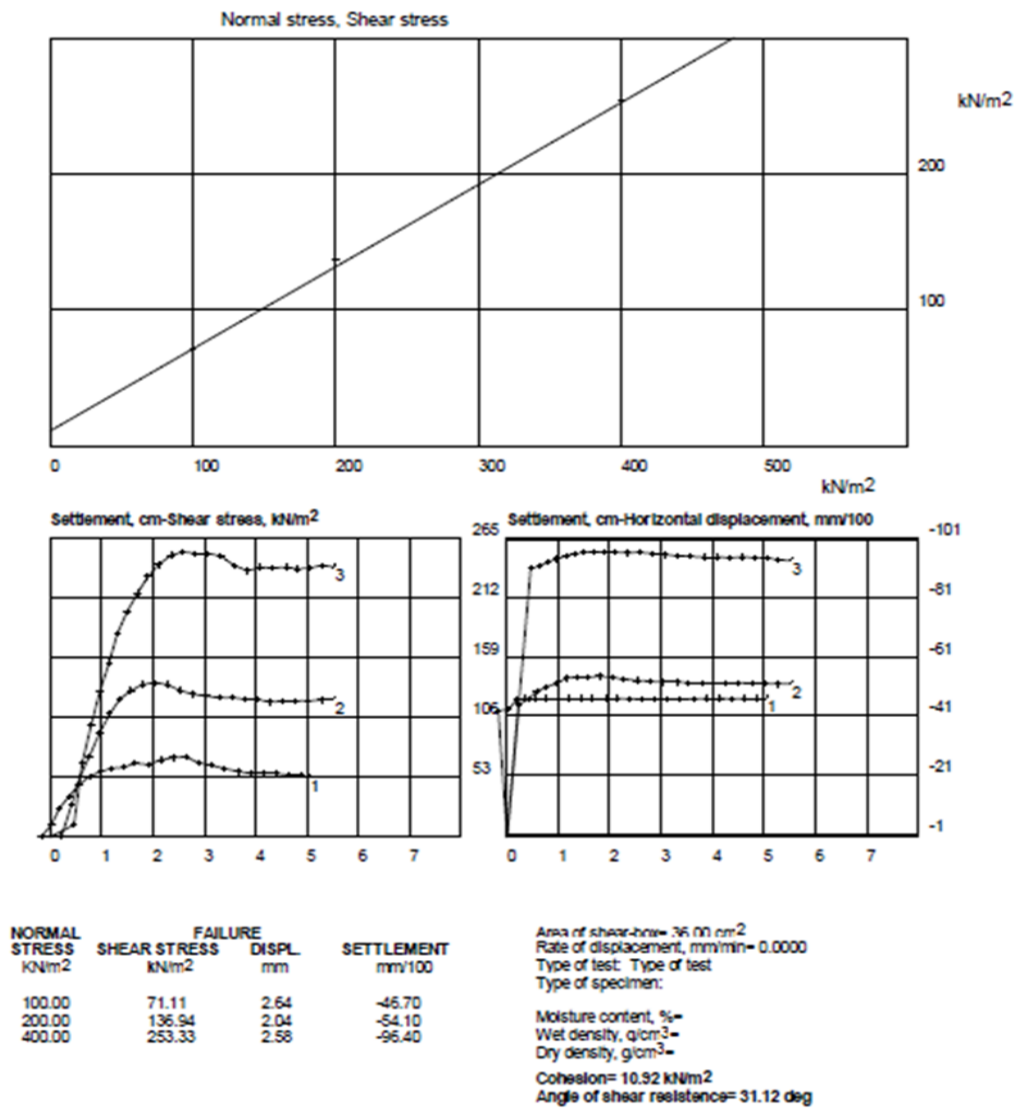


Figure III.8: Essais de cisaillement à contrainte normale constante
 Surface béton lisse, sable de dune ($I_d=90\%$)
 a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal.

III.4. Surface rugueuse (béton):

Sable lâche:

Des essais ont été réalisés avec du sable à des charges monotones ($\sigma_{no} = 100$ et 200 et 400 kPa).

Une analyse des résultats obtenus (Figures III.11a à III.11b) montre que dans la contrainte de cisaillement augmente rapidement au début des essais pour atteindre un palier puis elle se stabilise de l'ordre de (3.8 mm), jusqu'à la fin de chargement,

En ce qui concerne le déplacement normal dans le cas des charges ($\sigma_{no} = 100$ et 200 et 400 kPa) on remarque que le comportement est contractant au début, puis elle devient dilatante sans stabilisation.

Sable dense:

Afin d'étudier l'influence de la contrainte normale initiale, nous avons effectué des essais à trois valeurs de la contrainte normale initiale à ($\sigma_{no} = 100$ et 200 et 400 kPa).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures [III.12a et III.12b]. On constate que la Contrainte de cisaillement augmente rapidement au début du chargement. Elle atteint un pic pour un déplacement Tangentiel de l'ordre de 3 mm, puis elle diminue Figure [III.12a], on remarque que la stabilisation apparaît tardivement pour des cisaillements importants.

L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la Figure [III.12b]. On constate que le déplacement Tangentiel présente une phase de contractante et d'une phase dilatant, la phase de contractante augmente avec la contrainte initiale et la phase de dilatance diminue.

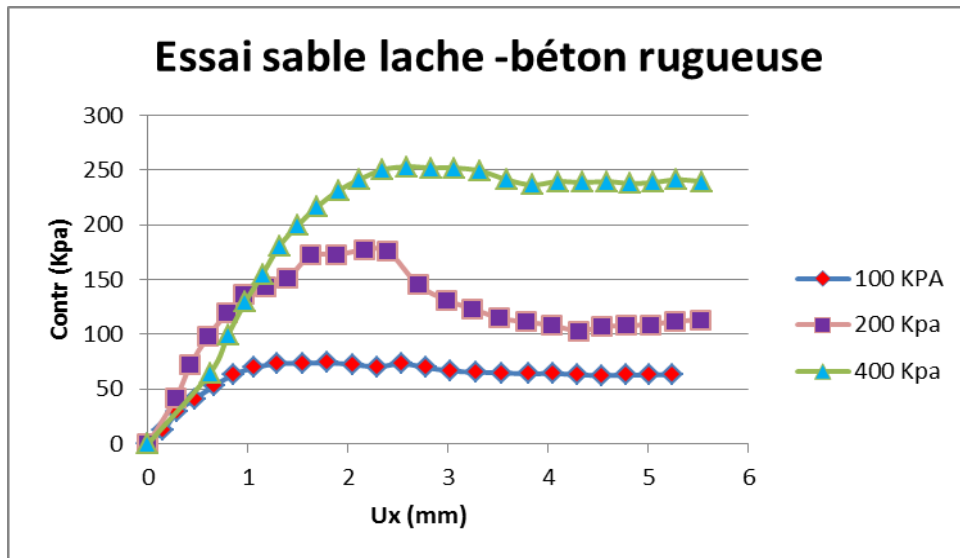


Figure III .9: les résultats d'essai de cisaillement sable lâche –béton rugueuse

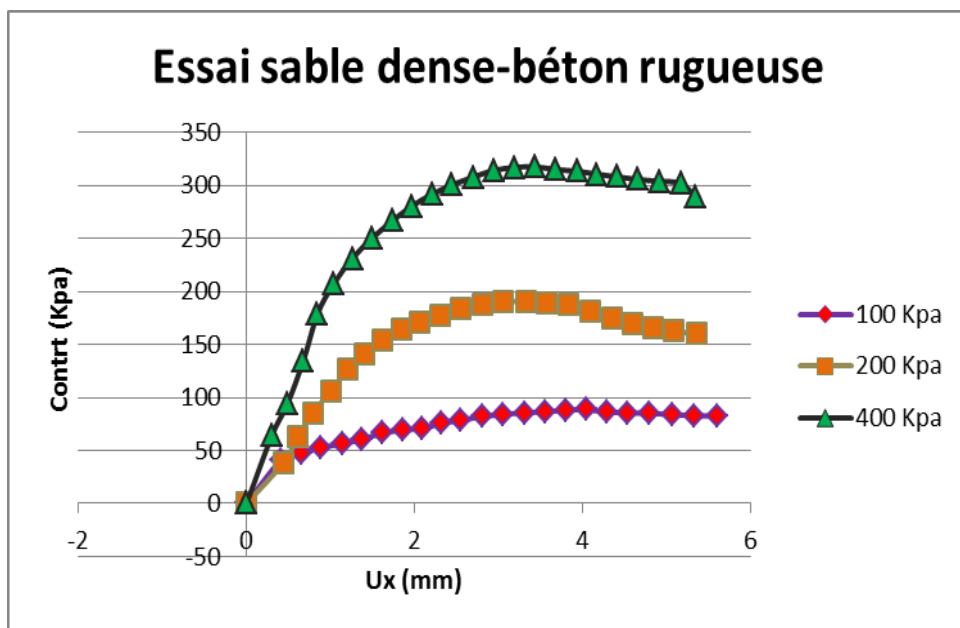


Figure III .10: les résultats d'essai de cisaillement sable dense –béton rugueuse

Sable lâche :

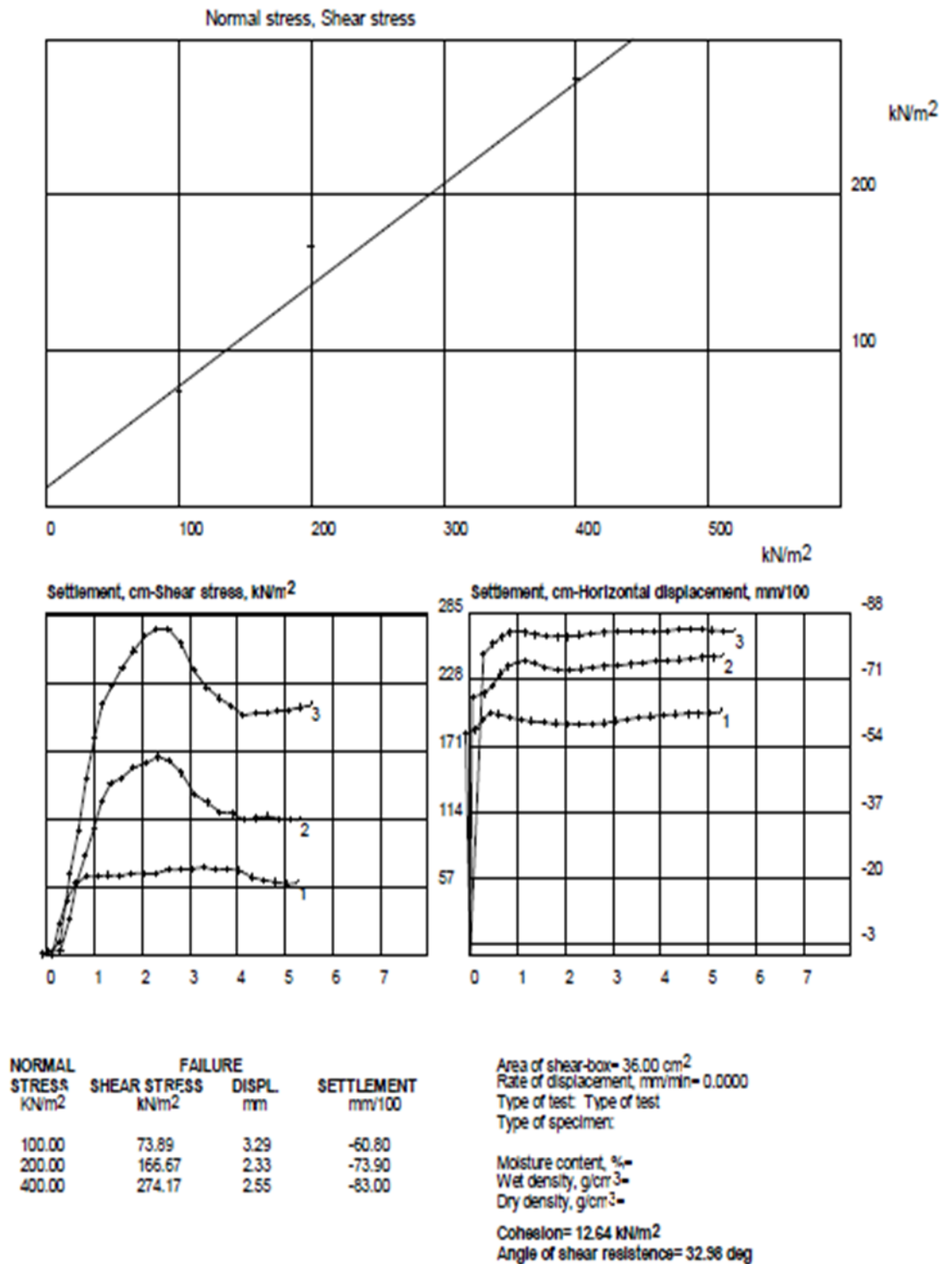


Figure : III.11. Essais de cisaillement à contrainte normale constante
Surface béton rugueuse, sable de dunes (I_d=15%)
a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal

Sable dense :

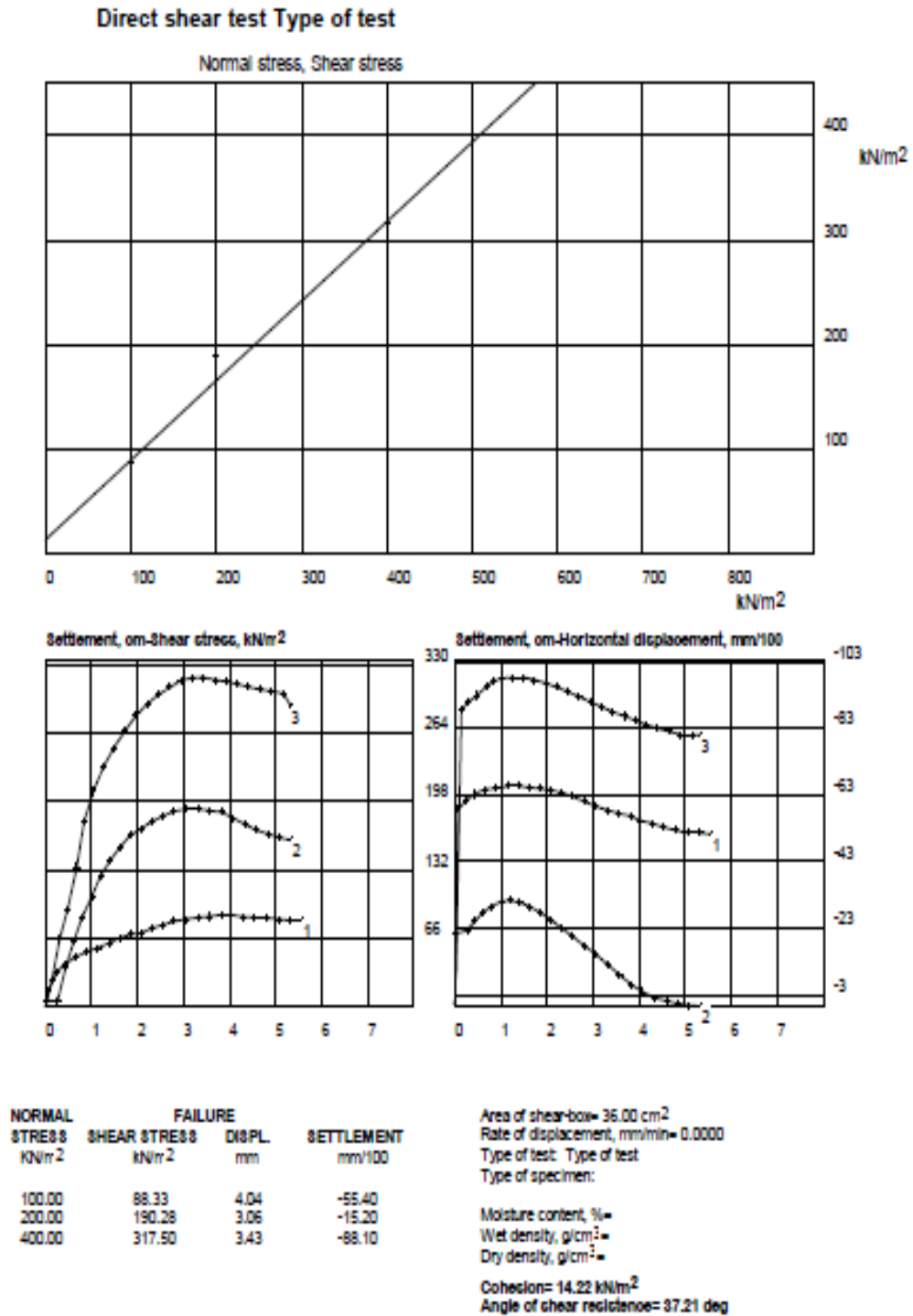


Figure : III 12. Essais de cisaillement à contrainte normale constant
 Surface rugueuse (béton), sable des dunes (Id=90%)
 a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal.

III.5. Etude des angles de frottement et de dilatance :

Afin d'illustrer l'influence des propriétés d'interface et la contrainte de confinement sur angles de frottement et de dilatance, nous avons reporté dans les tableaux [III.1 à III.2] leur évolution avec la contrainte normale.

Ces angles ont été déterminés à partir de modèle de Mohr-Coulomb non associé. On Détermine la valeur de l'angle de frottement (ϕ) par régression linéaire sur les points (σ_{no} , τ) à la rupture. La valeur de l'angle de dilatance est déterminée par la pente de la partie linéaire de la phase de dilatance dans le repère (ϵ_n , ϵ_t). Une analyse de ces tableaux montre que:

Cas 1 : sable lâche

- L'angle de frottement interne diminue avec l'augmentation du confinement
- Un écart moyen de l'ordre de 3° est noté entre les angles de frottement mesurés avec les Surfaces rugueuses et lisse.
- L'angle de dilatance est diminué avec l'augmentation du confinement, donc l'angle de Dilatance insensible à l'évolution du confinement pour les sables lâches alors qu'il diminue avec l'augmentation du confinement.

Cas 2 : sable dense

- Dans le cas de sable dense on constate un écarte de double entre les angles de frottement mesurés avec les surfaces rugueuses et lisse.
- Un écart moyen de l'ordre de 8° est noté entre les angles de frottement mesurés avec les Surfaces rugueuses et lisse.

Tableau III.1: Evolution de l'angle de frottement ϕ en fonction de la contrainte de confinement σ_{no} .

Essai:	σ (kPa):	Surface sable-sable	Surface béton lisse	Surface béton rugueuse
Sable lâche :	100	$\phi=34.14^\circ$	$\phi=32.68^\circ$	$\phi=32.38^\circ$
	200			
	400			
Sable dense:	100	$\phi=34.14^\circ$	$\phi=31.12^\circ$	$\phi=37.21^\circ$
	200			
	400			

Tableau : III.2. Evolution de l'angle de dilatance ψ en fonction de la contrainte de confinement σ_{no}

Essai:	σ (kPa):	Sable-sable:	Sable –béton lisse:	Sable –béton rugueuse:
Sable lâche :	100	$\Psi=37^\circ$	$\Psi=36^\circ$	$\Psi=28^\circ$
	200			
	400			
Sable dense:	100	$\Psi=25^\circ$	$\Psi=25^\circ$	$\Psi=31^\circ$
	200			
	400			

III.6.Effet de la rugosité et de la densité initiale :

III.6.1. 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, et pour les essais sable-surface rugueuse Le comportement est dilatant avec radoucissement, par contre, pour les essais sable- surface lisse le comportement est contractant tout au long de chargement puis on constate une stabilisation Figures [III.13.III .14].

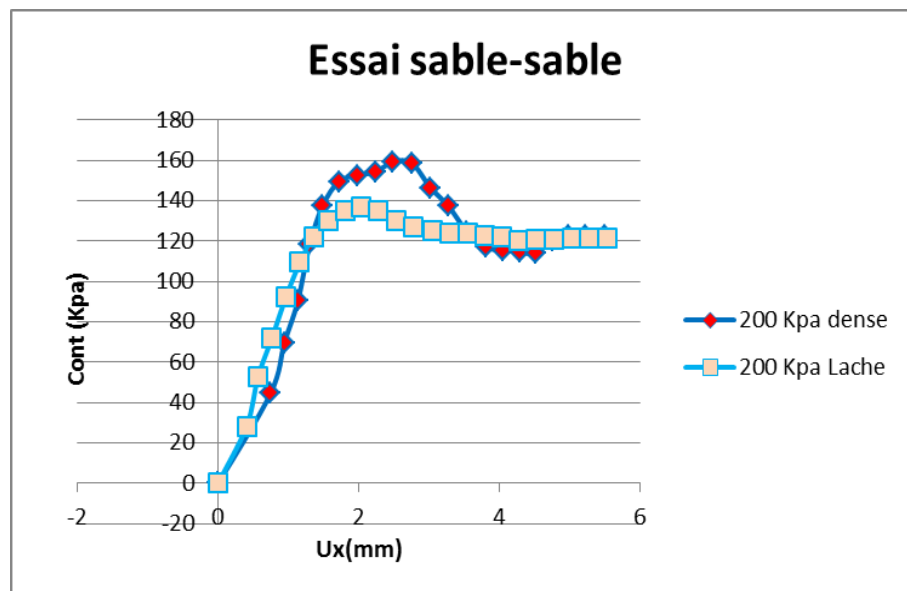


Figure III.13: comparaison de l'influence de densité entre les essais sable-sable (lâche-dense) 200 kPa.

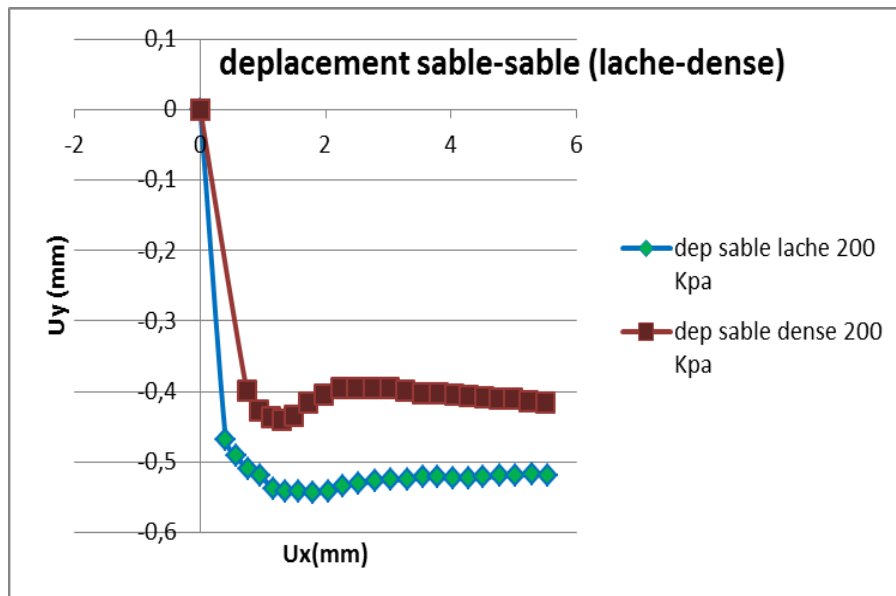


Figure III.14 : déplacement sable-sable (lâche –dense) 200 kPa.

III.6.2. Effet de la Rugosité:

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 Figures [III. 15, III.16].

On constate que la résistance au cisaillement augmente avec la rugosité.

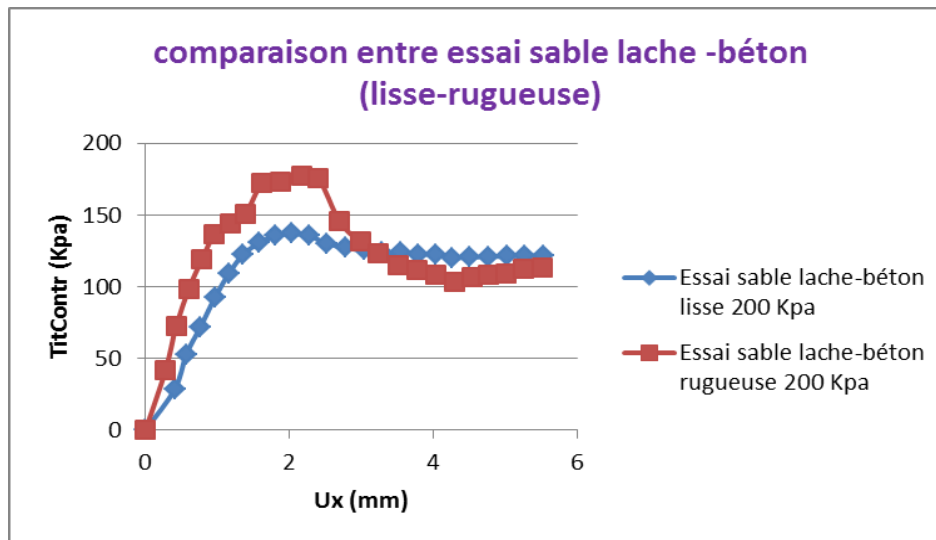


Figure III.15 : comparaison de l'influence de la rugosité entre les essais sable lâche -béton (lisse –rugueuse) 200 kPa.

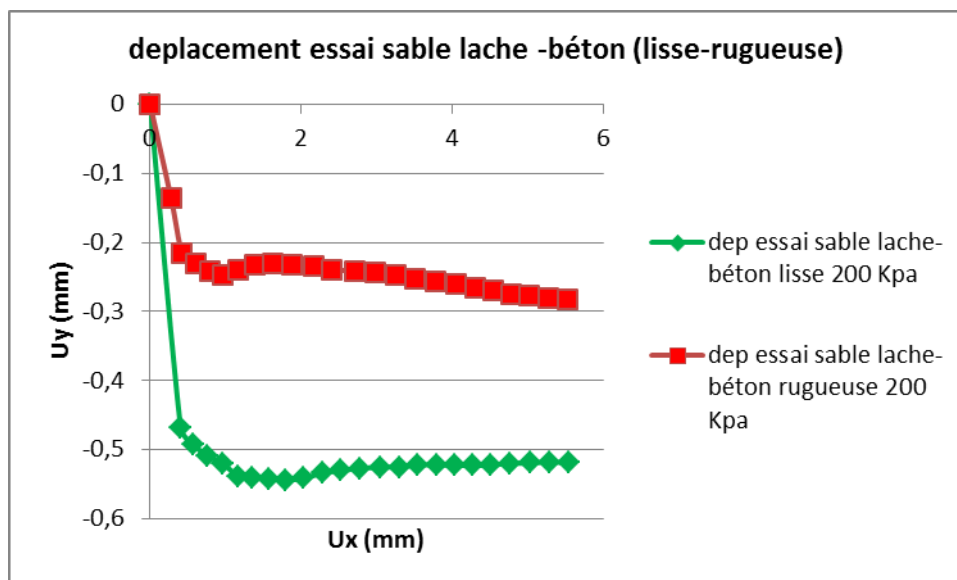


Figure III.16 : déplacement sable lâche –béton (lisse-rugueuse) 200 kPa.

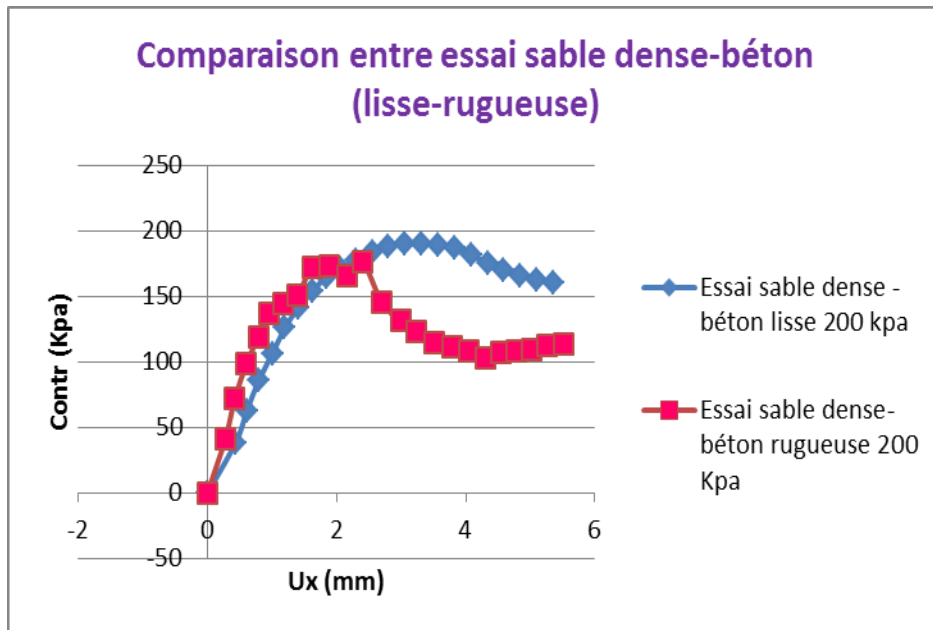


Figure III.17 : comparaison de l'influence de la rugosité entre les essais sable dense -béton (lisse –rugueuse) 200 kPa.

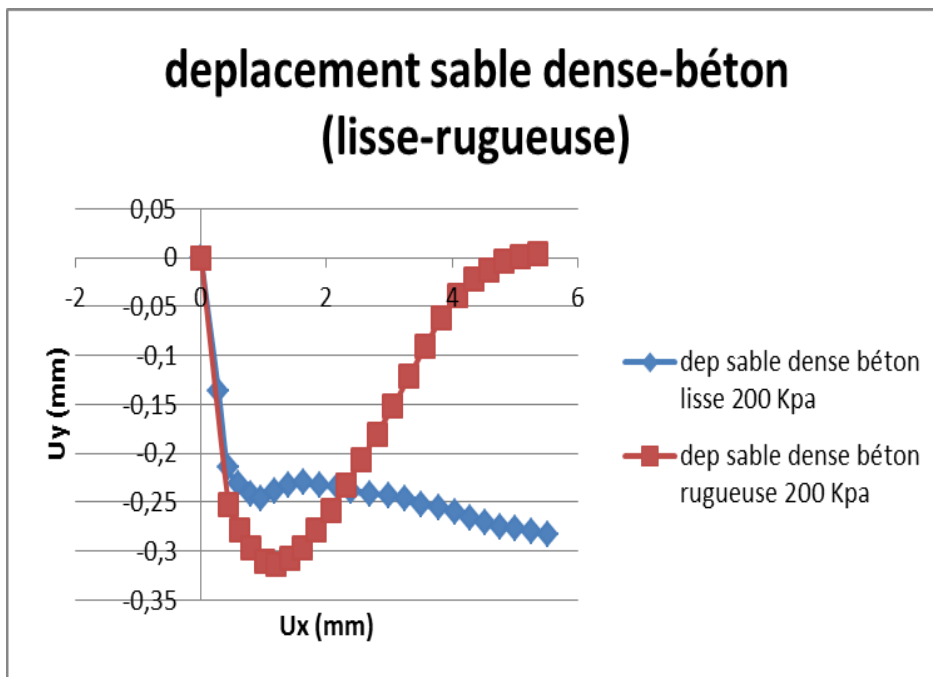


Figure III.18 : déplacement sable dense –béton (lisse-rugueuse) 200 kPa.

REMARQUE:

Je prends les résultats de 200 kPa à cause de la précision qui me donner pendant la comparaison que l'ai fait.

III.7.CONCLUSION :

Dans ce chapitre on détermine le comportement de l'interface sol-structure de notre sol à partir des essais au laboratoire, et on a étudié l'influence de principaux paramètres (la rugosité, la densité initiale et la contrainte normale initiale) sur le comportement de l'interface sol-structure.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire un travail de recherche expérimental sur le comportement mécanique d'un sable des dunes, il s'agit d'un problème aux limites de l'interaction sol-structure où l'interface joue un rôle essentiel au comportement de nombreux ouvrages en génie civil.

La synthèse bibliographique effectuée sur le comportement des sables sous sollicitations homogènes a montré que la réponse de ce type de sols aux sollicitations qui leur sont appliquées est générée fondamentalement par leur compacité initiale (sable dense ou sable lâche).

La boîte de cisaillement direct reste, malgré ses défauts, l'outil le plus utilisé dans l'étude des interfaces sol-structure. Nous avons utilisé cet appareillage pour la réalisation d'une campagne d'essais de cisaillement monotones à contrainte normale constante sur le sable d'Oued miter El Mâarif (Wilaya de M'sila) à forte densité (lâche ou dense) et des structures en béton (lisse ou rugueuse).

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 et la contrainte normale initiale.

L'analyse paramétrique effectuée semble indiquer que les paramètres d'état initial (paramètres élastiques) comme les paramètres de déformation plastique (angle de dilatance) et de cisaillement (cohésion et angle de frottement) ont un effet considérable sur la courbe de tassement.

A partir des résultats de ces essais, les observations suivantes ont été faites, qui fournissent une idée sur les facteurs influençant le comportement d'interface sol-structure :

- ❖ 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, le comportement de l'interface est contractant tout au long, du chargement.

- ❖ 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.
Ces résultats confirment l'essentiel des connaissances déjà acquises sur le comportement drainé des sables (sables de rivières ou sables de plages) et montrent que les paramètres de comportement de ce sable (caractéristiques élastiques, caractéristiques de déformation Volumique, caractéristiques de cisaillement et de rupture) sont largement influencés par les conditions initiales de compacité et par les contraintes de confinement qui lui sont appliquées. Sa résistance au cisaillement, notamment, augmente avec la densité, tandis que sa déformabilité diminue.
La boîte de cisaillement direct : l'outil le plus utilisé dans l'étude des interfaces sol – structure.
 - Analogie entre le comportement des sols et celui des interfaces sol-structure.
 - Le comportement de l'interface est très influencé par la densité initiale (pic, contractante-dilatance).
 - la rugosité de l'interface modifie sensiblement son comportement (pic, radoucissement).
 - L'angle de frottement augment avec la densité et la rugosité.
 - Simulation satisfaisante des essais de cisaillement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **BENCHEIKH, B.** (1991) Interaction sol- structure: modélisation et résolution Numérique. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Lille. Lille. France.
2. **BJERRUM L. & LAMBVA A.** (1966)- "Direct simple shear tests on a Norwegian Quick clay." *Géotechnique*, Vol. 16, No.1, pp. 1-20.
3. **BOULON, M.,** 1989. Basic features of soil structure interface behavior. *Comput. Geotech.* 7, 115–131.
4. **BOULON M. & NOVA R.** (1990)- " Modeling of soil-structure interface behavior- A comparison between elastoplastic and rate *type model*" *Computer & Geotechnics*, Vol. 9, pp. 21-46.
5. **Desai, C., Drumm, C., Zaman, M.,** 1985. Cyclic testing and modeling of interfaces. *J. Geotech. Eng. ASCE* 111 (GT6), 793–815.
6. **Desai, C. S. and Nagaraj, B. K.,** Modelling for cyclic normal and shear Behaviour of interfaces. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1988, 114(7), 1198-1217.
7. **Evgin, E., Fakharian, K.,** 1996. Effect of stress paths on the behavior of sand-steel Interfaces. *Can. Geotech. J.* 33, 853–865.
8. **Fakharian, K., Evgin, E.,** 2000. Elasto-plastic modeling of stress-path-dependent Behavior of interfaces. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 24, 183–199.
9. **Gennaro, V., Frank, R.,** 2002. Elasto-plastic analysis of the interface behavior Between granular media and structure. *Comput. Geotech.* 29, 547–572.
10. **Khemissa M.** Communications aux Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur : « Risques géotechnique et environnementaux liés à
11. L'aménagement ». INSA de Lyon, France, 27-29/06/2006.
12. **Khemissa M.**
13. **KISHIDA H. & UESUGI M.** (1987) - "Tests of the interface between sand and steel In the simple shear apparatus" - *Géotechnique* 37, No. 1, 1987, pp. 45-52.
14. **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.
15. **REZAIE, F.,** "Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique". Thèse de doctorat, Université des Sciences et technologies de Lille, 1994.
16. **ROSCOE K. H.** (1953)- "An apparatus for the application of simple shear to soil
17. Samples." *Proc. and Int. Conf. Soil Mecha. Found. Eng. Vol. 1, pp. 186-191*
18. **SHAHROUR I. & BENCHEIKH 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, pp. 269-275. 104
19. **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 appliqués, pp. 400-408.
20. **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 appliqués, pp. 400-408.
21. **Mohamed Khemissa & Naoui Tallah & Boubaker Bencheikh** " Comportement de l'interface sol-structure sous chargements monotone et cyclique " *Innovative Infrastructure Solutions* , <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-018-0130-y>

22. **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, pp. 145-152.
23. **ZAMAN M.M.; DESAI C.S. & DRUMM E.C.** (1984) - "Interface model for Dynamic soil structure interaction" - Jour. of Geotech. Engin. Vol. 110, No. 9.
24. **BARBAS, A. et FRANK, R.** (1982) Utilisation de la méthode des éléments finis En mécanique des sols dans le domaine de l'élastoplasticité. Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées. Rapport de recherche LPC n°146, Paris, France.