



**Ministère de l'Enseignement Supérieure
et de la Recherche Scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique

THEME

**ETUDE EXPERIMENTALE ET
NUMERIQUE DE L'INTERFACE SOL-
STRUCTURE SOUS CHARGE
CYCLIQUE**

Dirigé par :

**Mr. KHEMESSA Mohammed, Grade, professeur, Encadreur
Mr. TALLAH NAOUI, Grade, M.A.A, Co- Encadreur**

Présenté par :

BARKAT DJAAFAR

Promotion : 2015/2016.

REMERCIEMENTS

Je ne remercie jamais assez ALLAH, le tout puissant de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, Je remercie Mr. KHEMISSA M^{ed}, professeur à l'Université de M'Sila et Mr. TALLAH NAOUI Maître Assistant 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 me font en acceptant de juger mon travail.

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

DEDICACES

بسم الله الرحمن الرحيم

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenus durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protège et les garde.

tous mes amis

Tous les enseignants de faculté de technologie .

Toute la promotion 2016.

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

Sommaire

Chapitre I

Étude bibliographique sur l'interaction sol-structures

Introduction.....	4
I. Caractérisation du comportement de l'interface sol-structure.....	4
I. 1. Définition de l'interface sol-structure.....	4
I.1.1. Caractérisation expérimentale de l'interface.....	5
I.1.2. Influence des différents paramètres sur le comportement de l'interface	12
I.2. Modélisation du comportement de l'interface.....	15
I.2.1. Modèles élastoplastiques bidimensionnels.....	15
I.2.2. Modèles élastoplastiques tridimensionnels.....	22
I.2.3. Discrétisation par éléments finis du problème de contact en géotechnique.....	24
I.2.4. Détails sur la mise en œuvre numérique de l'élément d'interface.....	28
I.3. Les sollicitations cycliques en géotechnique.....	32
I.3.1- Les essais de laboratoire.....	32
I.3.2- Les essais de cisaillement cycliques.....	33
I.4. Conclusion.....	42

Chapitre II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE

II.1. Description de l'appareillage.....	43
II.2. Mode opératoire.....	45
Préparation de l'échantillon.....	45

Phase de cisaillement.....	45
II.3. MATERIAUX ETUDIES.....	46
Caractéristiques physiques.....	46
Analyse granulométrique.....	47
II.4. CONCLUSION.....	49

Chapitre III

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

III.1. ESSAIS REALISES SUR SABLE.....	50
III.2. Surface sable-sable.....	50
Sable lâche.....	50
Sable dense.....	51
III.3. ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE DE DUNE.....	52
III.3.1. Surface sable sable.....	52
Sable dense.....	52
Sable lâche.....	53
III.3.2. Surface sable _structure.....	54
III.3.2.1 Surface rugueuse (Acier)	54
Sable dense.....	54
Sable lâche.....	59
III.3.2.2 Surface lisse (Acier)	64
Sable dense.....	64
Sable lâche.....	68
III.3.3.Effet de la densité initiale et de la rugosité de la surface.....	72
III.4.CONCLUSION	77

Chapitre IV :

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE

SOL-STRUCTURE

1èrePARTIE 78

IV.1.PRÉSENTATION DE PLAXIS.....	78
IV.1.1. Introduction.....	78
IV1.1.1.Le code éléments finis PLAXIS.....	78
IV.1.2. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS.....	81
1.Introduction.....	81
IV.1.2.2. Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles	82
IV.1.2.3. Comportement élastoplastique	83
IV.1.2.4. Modèle de Mohr-Coulomb	84
IV.1.3.Calcul	89
IV.1.3.1.Le programme de calcul	90
IV.1.3.2. Caractéristiques générales des calculs	90
IV.1.3.3.Types de calculs	91
IV .1.3.4 Le module dynamique de Plaxis.....	91
IV.1.4. Paramètres de contrôle du calcul	101
IV.1.4.1. Construction par étapes	101
IV.1.4.2. Activation ou modification des chargements	102
IV.1.5. Exécution de la procédure de calcul	102
IV.1.6. Résultats affichés pendant les calculs	103
IV.1.7. Le programme de résultats (output)	103
IV.1.8. Le menu des résultats	104

IV.1.9. Le programme courbe (curves)	104
IV2.ÉTABLISSEMENT D'UN MODELE GÉOMÉTRIQUE	105
IV.2.1. Introduction	105
IV.2.2. Définition des données	105
IV.2.2.1. Paramètres de sol et de l'interface	107
IV.2.2.2.Génération du maillage	109
IV.2.3.Procédure de calculs	110
IV.2.4.Les principaux résultats	115
IV.2.4.1.Déformation de maillage	115
IV.2.4.2.Les points plastique	116
IV.2.4.3.Simulation des essais d'interface	118
IV.2.4.3.1.surface sable-sable	118
Sable lâche.....	118
Sable dense.....	118
IV.2.4.3.2.surface Acier lisse	121
Sable lâche.....	121
Sable dense.....	121
IV.2.4.3.3.surface Acier rugueuse	123
Sable lâche.....	123
Sable dense.....	123
IV.2.4.4.Caractéristiques de la comportement cyclique	125
IV.3.CONCLUSION	134

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Conditions aux limites dans la direction normale de l'interface (a) CNC, (b) VC, (c) RNC (Evgin et Fakharian 1996).....	8
Figure I-2 Réponses mécaniques typiques de l'interface à CNC.....	9
Figure I-3 Influence de la contrainte normale sur le comportement de l'interface sable dense-acier (Hu et Pu 2004).....	12
Figure I-4 Influence de la rugosité sur le comportement de l'interface sable dense – acier (Hu et Pu 2004)	14
Figure I-5 Influence de la densité sur le comportement de l'interface sable d'Hostun-acier rugueux à l'ACSA (Dumitrescu 2005).	15
Figure I-6 Critère de rupture de Mohr-Coulomb (a) Enveloppe bilinéaire pour les joints tenant compte des aspérités (Goodman 1989) (b) Enveloppe linéaire pour les interfaces	17
Figure I-7 Analogies dans le comportement observé à l'essai triaxial et l'essai de cisaillement direct pour les sables (Boulon et Nova 1990)	18
Figure I-8. chargement incrémentale et réponse incrémentale (Boulon 1991).....	22
Figure.I.9. contrainte agissant sur l'interface.....	23
Figure.I.10. Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure.....	24
Figure.I.11. Surface de discontinuité et l'élément d'interface à deux nœuds (Frank et al) ...	26
Figure.I.12. élément sans épaisseur.....	26
Figure.I.13. élément couche mince à 6noeuds (Sharma et Desai 1992)	27
Figure.I.14. critère orienté utilisé pour l'interface couche mince.....	28
Figure.I.15. élément d'interface isoparamétriques à 8 nœuds (de Gennaro et Frank).....	28
Figure.I.16. étude paramétrique du rapport de forme.....	28
Figure I-17. Observations lors de la réalisation d'essais cycliques (Lemaitre et Chaboche, 1985).....	34
Figure I-18 Evolution de la contrainte de cisaillement et du déplacement normal	35
Figure I-19 Evolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale	35
Figure I-20 Evolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale	36
Figure I-21: Résultat d'un essai triaxial cyclique (Hornych, 2006).....	38
Figure I-22 : Résultats typiques d'un essai triaxial cyclique non drainé.....	39

Figure I-23: Essai de cisaillement simple cyclique(sable dense, densité relative : 70 %) (Song et al, 2004).....	40
Figure I-24 : Essais de cisaillement direct – Nombre de cycles NF induisant la rupture de l'échantillon (Argile de Drammen normalement consolidée) (Andersen et Lauritzen, 1988).....	41
Figure.II.1: Principe de la boîte de cisaillement direct.....	43
Figure.II.2.a /surface rugueuse en acier , b /.surface lisse en acier.....	44
Figure.II.3. Appareil de cisaillement direct.....	45
Figure.II.4. vus de sable	46
Figure.II.5. essai la masse volumique. , Figure.II.6. essai l'équivalent de sable.	47
Figure.II.7. essai de l'analyse granulométrique.....	47
Figure.II.8. Courbe granulométrique du sable testé.....	48
Figure.III.1. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	51
Figure.III.2. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	51
Figure.III.3. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	52
Figure.III.4. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	53
Figure.III.5. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	55
Figure.III.6. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	57
Figure.III.7. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	58
Figure.III.8. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	60
Figure.III.9. Essais de cisaillement à contrainte normale constante.....	62
Figure.III.10. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	63
Figure.III.11. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	64
Figure.III.12. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	66
Figure.III.13. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	67
Figure.III.14. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	69
Figure.III.15. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	70
Figure.III.16. Essais de cisaillement à contrainte normale constante	71

Figure.III.17. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface rugueuse.....	72
Figure.III.18. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface rugueuse.....	73
Figure.III.19. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface rugueuse.....	73
Figure.III.20. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface lisse.....	74
Figure.III.21. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface lisse.....	74
Figure.III.22. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la densité, sable des dunes, surface lisse.....	75
Figure.III.23. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la rugosité, sable des dunes dense.....	76
Figure.III.24. Essais de cisaillement à contrainte normale constante Effet de la rugosité, sable des dunes lâche.....	76
Figure.IV.1. Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastiques.....	83
Figure.IV.2. Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.	84
Figure.IV.3. Représentation du comportement élastoplastiques avec écrouissage.....	84
Figure.IV.4. Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.	85
Figure.IV.5. Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.....	86
Figure.IV.6. Définition du module à 50 % de la rupture...	87
Figure.IV.7. Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.....	101
Figure.IV.15. Onglet Paramètres de la fenêtre de calcul (Calculations).....	101
Figure.IV.16. Fenêtre de calcul.....	103
Figure.IV.17. Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output.....	103
Figure.IV.18. Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Curves.....	104
Figure.IV.19. Modèle géométrique du problème (essai sol-sol)	106
Figure.IV.13. Modèle géométrique du problème (essai sol-structure).....	106
Figure.IV.14. Maillage du problème (essai sol-sol).	109
Figure.IV.15. Maillage du problème (essai sol-structure).	110
Figure.IV.16. Déformation du Maillage (essai sol-sol).	115

Figure.IV.17. Déformation du Maillage (essai sol-structure).....	116
Figure.IV.18. les points plastique (essai sol-sol).....	116
Figure.IV.19. les points plastique (essai sol-structure).....	117
Figure.IV.20. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable....	119
Figure.IV.21. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable.....	120
Figure.IV.22. Simulation des essais à contrainte normale constante surface lisse.....	121
Figure.IV.23. Simulation des essais à contrainte normale constante surface lisse	122
Figure.IV.24. Simulation des essais à contrainte normale constante surface rugueuse.....	123
Figure.IV.25. Simulation des essais à contrainte normale constante surface rugueuse.....	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Quelques dispositifs d'étude du frottement d'interfaces granulaires (Frih 2005).....	7
Tableau I.2. Synthèse des valeurs expérimentales sur l'épaisseur de la couche d'interface (Frih 2005).....	11
Tableau I.3. Analogies entre l'essai triaxial et l'essai de cisaillement direct (d'après Boulon et Nova 1990).....	15
Tableau I.4. résume les fonctions de charge, les potentiels plastiques ainsi que les variables d'écrouissage utilisées dans quelques modèles élastoplastiques d'interface.....	21
Tableau I.5. détermination des caractéristique mécanique élastique fictive dan le cas de l'élément couche mince en déformation plane et déformation axisymétrique.....	30
Tableau II.1. analyse granulometrie de sable de dune.....	48
Tableau. IV.1. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol.....	107
Tableau. IV.2.1. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-structure surface lisse....	108
Tableau. IV.2.2. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-structure surface rugueuse.....	108
Tableau. IV.3. propriétés de la structure.....	109
Tableau.IV.4. les paramètre β , G et η dans l'essai sol_sol.....	128
Tableau.IV.5. les paramètre β , G et η dans l'essai sable_structure.....	133

NOTATIONS

σ_n	(Kpa)	Contrainte normale
τ	(Kpa)	Contrainte de cisaillement
ε_n	(mm)	Déplacement relatif normal
ε_t	(mm)	Déplacement relatif tangentiel
τ	(Kpa)	Contrainte limite de cisaillement
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
ϕ	(degrés)	Angle de dilatance
δ'	(degrés)	Angle de frottement effectif
σ_{no}	(Kpa)	Contrainte normale initiale
G	(-)	Module de cisaillement
Id	(%)	Indice de densité
Dr	(%)	Densité relative
E	(Kpa)	Module d'Young
ν	(-)	Coefficient de Poisson
R_{inter}	(-)	Résistance d'interface
β	(-)	Coefficient d'amortissement
η	(-)	Coefficient de perte

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. Il est composé de deux parties:

Dans la première partie, nous présentons les résultats des essais cyclique 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 de Bou-saâda) à contrainte normale constante.

Dans la deuxième partie, on a modélisé l'appareil de cisaillement direct par le code des éléments finis (**PLAXIS 8.2**), qui représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifiques et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. La modélisation a été conduite pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol et la résistance à l'interface sol-matériau solide (acier) ayant différentes rugosités de surface.

- ❖ Les résultats obtenus indiquent que le comportement à l'interface sol-matériau solide varie selon la rugosité de surface, et la contrainte de cisaillement cyclique à l'effort normal constant diminuée dans le cas du sable dense et augmente dans le cas du sable lâche.

Mots clés :

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

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. It is composed of two parts:

In the first part, we present the results of cyclic tests of soil-structure which were realized by means of modified direct shearing box, these tests were realized on a local material (sand of Bou-saâda) with constant normal stress.

In the second part, we have modeled the shear apparatus by (PLAXIS 8.2), code planned by the geotechniciens, which represent an actual optimum on the scientific and partial plans of pseudo-static analysis 2D the modeling driven to define the résistance at shear ground-ground and interface ground-solid substance (steel, concrete), having different rough surface, an analysis of model have undergone an important distortion.

The results obtained show that the behavior of interface ground-solid substance varied according to (depending on) surface rough (rigidity).

Key words:

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

INTRODUCTION GENERALE

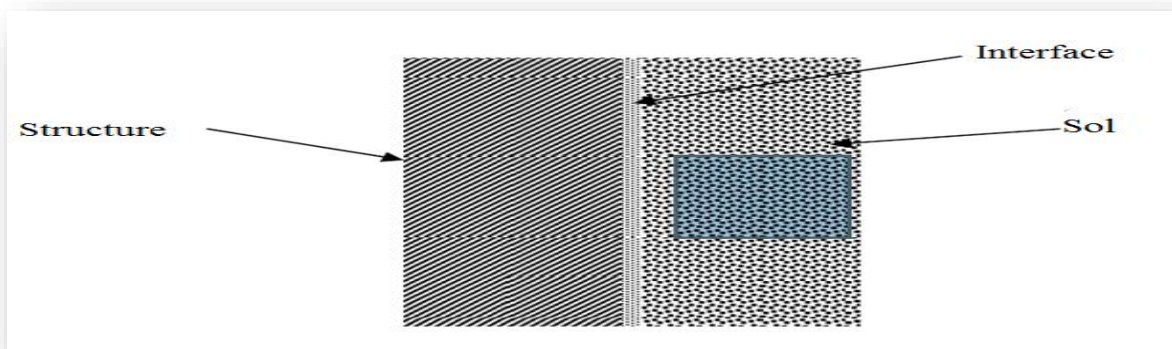
Le comportement des ouvrages en Génie Civil dépend en grande partie de celui des interfaces sol-structure. En effet, dans la littérature en géotechnique de ces trois dernières décennies une partie importante est consacrée au développement et à l'amélioration des techniques d'analyse du phénomène d'interaction sol-structure, la transmission des efforts, de la structure vers le sol, se fait à travers une fine 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 et cycliques. 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.

1. 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 (Figure 1) 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 connu.



Interface (épaisseur fine entre le sol et une structure)

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

INTRODUCTION GENERALE

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. De ce fait une étude sur le cisaillement à l'interface acier-sol a été conduite en modélisant l'appareil de cisaillement directe par **PLAXIS V8.2**(c'est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des ouvrages géotechniques).

La résistance au cisaillement entre sols fins et surfaces solides dépend des conditions de sa mobilisation, c'est à dire en condition drainée ou non drainée.

2. Objectifs de la recherche :

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

De ce fait, cette étude numérique par modélisation porte sur le cisaillement à l'interface matériau solide-sable en utilisant l'appareil de cisaillement direct.

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

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 de contrôler le cisaillement à l'interface, il est nécessaire tout d'abord de caractériser les matériaux impliqués (sable, acier).

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

3. Plan de la thèse :

Les travaux présentés dans ce mémoire à caractère théorique et numérique ont pour but de caractériser le comportement mécanique de l'interface sous charge cyclique, entre un milieu granulaire et une structure rigide (acier), et comprend quatre 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, et en fin aperçuausollicitation cyclique en géotechnique.

Chapitre 2 : dispositif expérimental utilisé et mode opératoire.

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

Chapitre 4 : décrit Le code des éléments finis PLAXIS Conçu par des géotechniciens numériques, et résume Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS (le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement).

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR L'INTERACTION SOL-
STRUCTURES

Chapitre I: Synthèse bibliographique

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. Caractérisation du comportement de l'interface sol-structure

I. 1. Définition de l'interface sol-structure

Plytas (1985) appelle interface, la fine zone de sol siège de grands changements de structure et de rupture de grains dus au cisaillement localisé intervenant au contact d'une inclusion dans le sol, sollicitée axialement. Boulon (1988) définit les interfaces sol-structure Comme étant de purs concepts. Ils sont, dit-il, constitués principalement par une partie du sol au contact avec la structure, et secondairement, parfois, par quelques particules arrachées à la structure.

Hoteit (1990) définit l'interface comme étant une limite commune de deux systèmes permettant des échanges entre ceux-ci. Hassan (1995) définit l'interface comme une frontière commune à deux systèmes différents à travers laquelle des échanges ont lieu. Elle est également décrite comme une discontinuité entre deux matériaux aux propriétés différentes (Desai et Rigby 1995) ou, encore, comme une zone mince de sol "remanié" (perturbé) au contact direct de la structure (Desai et Toth 1996 ; De Gennaro 1999 ; Karabatakis et Hatzigogos 2002 ; Gaba et al., 2003). D'un point de vue géométrique, l'interface sol-structure est définie comme la fine zone de sol qui se forme entre la surface de la structure et le volume de sol l'entourant (De Gennaro 1999 ; Cai et Ugai 2002).

Les problèmes d'interaction sol-structure ainsi que les problèmes reliés à la mécanique des joints dans les roches dépendent principalement du comportement de cette interface. La réponse des systèmes sol-structure comme les fondations profondes et superficielles, les tunnels,

les murs de soutènement, la terre armée, aux chargements monotones ou cycliques est ainsi influencée par les caractéristiques des interfaces.

I.1.1. Caractérisation expérimentale de l'interface

Physiquement, la couche d'interface définie précédemment, permet le transfert du chargement de la structure vers le sol. Pour déterminer les caractéristiques de cette couche mince, plusieurs types d'expérimentations ont été réalisés. On peut classer les essais d'interface en essais à contrainte normale constante "CNC" (Wernick 1978 ; Al-Douri et Poulos 1991 ; Tabucanon et Airey 1992 ; De Gennaro 1999 ; Frih 2005 ; Dumitrescu 2005), à volume constant "VC" (Schlosser et Guilloux 1981 ; Lerat 1996) ou à rigidité normale constante "RNC" (Johnston et al. 1987 ; Hoteit 1990 ; Evgin et Fakharian 1996 ; Ghionna et Mortara 2002) (Fig. I.1).

D'après les propos de Schlosser et Guilloux (1981), on pourrait déduire que l'essai le plus représentatif de la réalité est celui à volume constant ; en effet les auteurs affirment que la mise en traction (ou en compression) d'une inclusion dans le sol produit des contraintes de cisaillement dont les valeurs ne sont significatives que dans une zone limitée autour de l'inclusion. Dans cette zone, le sol a tendance à augmenter de volume par suite de la dilatance, mais s'en trouve en partie empêché par le reste du sol. Il en résulte une augmentation importante de la contrainte normale sur le pourtour de la zone de cisaillement et par suite à la surface de l'inclusion : c'est le phénomène de dilatance empêchée.

Par ailleurs, les essais à contrainte normale constante et à volume constant ont été considérés par plusieurs auteurs comme des chemins de cisaillement extrêmes contrairement à l'essai à rigidité normale constante qui est considéré comme un chemin intermédiaire qui permet de bien simuler les conditions réelles de frottement (Boulon 1988 ; Hassan 1995 ; Fakharian et Evgin 2000 ; Ghionna et Mortara 2002). Une autre classification des essais d'interface consiste à les diviser en essais de cisaillement direct qui sont présentés comme des dispositifs simples où l'on impose au sol de glisser par rapport à l'interface et essais de cisaillement simple qui se différencient des précédents par le fait que la surface de l'interface sol/matériau reste constante tout au long de l'essai et par l'identification séparée des composantes de déplacement (glissement, cisaillement).

A. Rappels de quelques appareils de caractérisation de l'interface

Depuis les années 1960, de nombreux types d'appareillages ont été développés. De la boîte de cisaillement direct plan modifiée aux derniers appareils utilisés, les améliorations des essais n'ont cessé de se développer. Dans le tableau I.1 (Frih 2005), un certain nombre de ces

dispositifs est rappelé en mentionnant les avantages et les inconvénients. Nous signalons aussi dans ce cadre l'existence de l'appareil de cisaillement cyclique multi-degrés de liberté (CYMDOF), capable d'exécuter les deux modes de cisaillement direct et simple (Desai et Fishman 1991) et permettant de mesurer la pression interstitielle en faisant des essais sur sol saturé (Desai et Rigby 1995).

Notons aussi que d'autres appareils de cisaillement permettent d'effectuer des essais de cisaillement sur sol saturé tel que l'appareil de cisaillement simple annulaire ACSA (Lerat 1996 ; De Gennaro 1999 ; Chambon 2003 ; Dumitrescu 2005 ; Frih 2005) (Tab. I.1). Dumitrescu (2005) remarque une augmentation du coefficient de frottement pour un essai de sable saturé par rapport au sable sec ainsi qu'une augmentation de la dilatance, ceci est dû au fait que la saturation d'un sable augmente sa rigidité au cisaillement (Cascante et al. 1998).

Plus récemment, un appareil de cisaillement simple tridimensionnel cyclique C3DSSI a été développé (Evgin et Fakharian 1996 ; Fakharian et Evgin 2000). Il permet à l'interface un cisaillement simultané dans les deux directions orthogonales du plan et a aussi la faculté de garder la contrainte normale constante ou la rigidité normale constante pendant le cisaillement.

Synthèse bibliographique

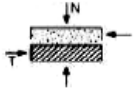
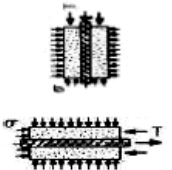
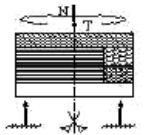
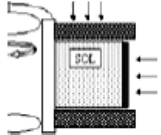
Type	Exemples	Avantages	Inconvénients
Cisaillement direct plan 	<i>Potvin (1961)</i> <i>Wernick (1978)</i> <i>Kulhawy et al. (1979)</i> <i>Acar et al. (1982)</i> <i>Plytas (1985)</i> <i>Desai et al. (1985)</i>	Dispositif simple Préparation et procédure faciles Surface de contact de la structure en dessous ou au dessus du sol	Effets de bords Difficultés de distinguer le glissement du sol le long de l'interface de la déformation du sol Risque de perte de matériau Surface de contact qui diminue avec l'augmentation du cisaillement Impossibilité de réalisation des cycles
Cisaillement direct axisymétrique 	<i>Coyle et al. (1967)</i> <i>Brumund et al. (1973)</i>	Configuration géométrique adaptée à l'étude du frottement des pieux et des ancrages Dispositif commode pouvant être obtenu par transformation d'un appareil triaxial standard Surface de contact constante	Concentration des contraintes à l'extrémité du chargement Contrainte normale à l'interface inconnue Influence de la manière de déposer le sol autour de la barre sur l'interaction. Pas d'identification indépendante des composantes du déplacement
Cisaillement annulaire direct 	<i>Yoshimi et al. (1981a et b)</i> <i>Boulon et al. (1991)</i>	Pas d'effets de bords Niveaux de contraintes très élevées Grand déplacement tangentiel (1000 mm) Possibilité de varier les conditions de sollicitations	Montage, procédure et préparation difficile Structure solide recouvrant le sol Pas d'identification indépendante des composantes du déplacement (Yoshimi et al. ont eu recours aux rayons X) Gradient de déplacement à l'interface et développement d'un cisaillement simple dans le sol (Boulon et al. corrigent ce défaut par un moule très rugueux)
Cisaillement simple plan 	<i>Goh et al. (1984)</i> <i>Uesugi et al. (1986 a et b)</i> <i>Uesugi et al. (1988)</i> <i>Zaman et al. (1995)</i>	Préparation et procédure facile Surface de contact constante Identification séparée des composantes du déplacement (glissement et cisaillement) Possibilité de visualisation directe de l'interface	Concentration des contraintes aux extrémités Contact sol-solide différent quand le sol se trouve au-dessus
Cisaillement double simple - direct <i>(Mesure de la distribution des frottements)</i> 	<i>Paikowsky et al. (1995)</i>	Cisaillement simple et direct Pas d'effets de bords Interface simple ou double pour la barre Surface solide interchangeable Surface de contact constante Identification séparée des composantes du déplacement	Instrumentation spéciale pour mesurer les contraintes le long de l'interface Nécessite une longueur suffisante de la barre pour une mesure correcte loin des zones non uniformes aux extrémités
Cisaillement simple annulaire 	<i>Lerat (1996)</i> <i>De Gennaro (1999)</i> <i>Chambon (2003)</i> <i>Dumitrescu et al. (2003)</i> <i>Corfdir et al. (2004)</i> <i>Présent mémoire</i>	Homogénéité des conditions aux limites de déplacement sur toute l'interface Plusieurs types de consolidation et confinement Déplacement tangentiel très important sans perte de matériau Vitesse de cisaillement variable en cours d'essai de 0 à 6 mm/min. Essais monotones et cycliques Niveaux de contraintes élevées (jusqu'à 1 MPa) Surface de contact constante Possibilité de visualisation directe de l'interface Choix de saturation et de drainage Surface solide interchangeable (possibilité de bétonnage sur place)	Montage, procédure et préparation difficiles Dispositif et échantillon de grandes dimensions Nécessite un appareil de pluviométrie pour un dépôt homogène de l'échantillon Contrainte normale à l'interface non contrôlée (uniquement une structure en acier lisse est équipée de capteurs locaux)

Tableau I-1 Quelques dispositifs d'étude du frottement d'interfaces granulaires (Frih 2005)

B. Observations expérimentales du comportement de l'interface :

Les observations expérimentales sont classées selon le type de sollicitation (CNC, VC ou RNC) (Fig. I.1).

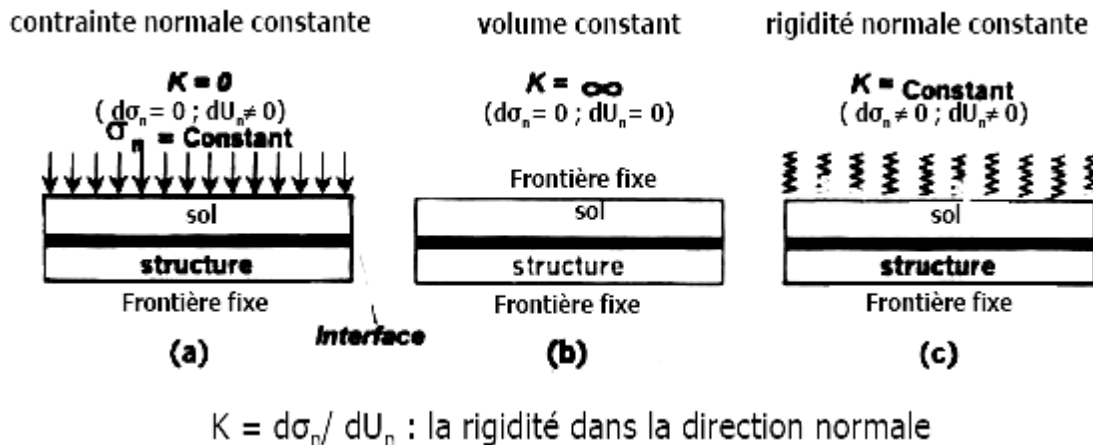


Figure I-1 Conditions aux limites dans la direction normale de l'interface (a) CNC, (b) VC, (c) RNC (Evgin et Fakharian 1996)

Dans le cas d'essais d'interface à contrainte normale constante, l'interface peut se contracter ou se dilater librement. Dans ce cas, les courbes typiques des essais de cisaillement sont, d'une part, l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif (u_t , τ) et, d'autre part, l'évolution du déplacement normal en fonction du déplacement tangentiel relatif (u_t , u_n). Une augmentation progressive du frottement est observée jusqu'à une condition de rupture (pic ou palier). La présence d'un pic de résistance au cisaillement se produit pour des sables denses. Ce pic est généralement suivi d'une phase de radoucissement puis d'une stabilisation du frottement (Fig. I.2). Du point de vue volumique, le phénomène de contractance-dilatance se traduit par une décroissance du déplacement normal (phase contractante) puis une croissance (phase dilatante) jusqu'à une stabilisation, qui est suivie parfois d'une diminution pour les grands déplacements associée par certains auteurs à une dégradation liée à la rupture des grains (Lerat et al. 1997 ; Dumitrescu 2005). La condition de contrainte normale constante est la plus fréquente et la plus simple à reproduire du point de vue des conditions aux limites. Si le chargement se fait à volume constant, les déplacements normaux, par contre, sont empêchés. Dans ce cas, la contrainte normale augmente ou diminue selon que le sol au voisinage de l'interface tend à se dilater ou se contracter (dilatance, ou contractante empêchées).

Enfin, la condition de rigidité normale constante (déplacement normal et contrainte normale variant proportionnellement suivant un rapport K constant) permet de présenter l'évolution de la contrainte normale et du déplacement normal qui reproduit l'état de dilatance ou de contractance de l'interface.

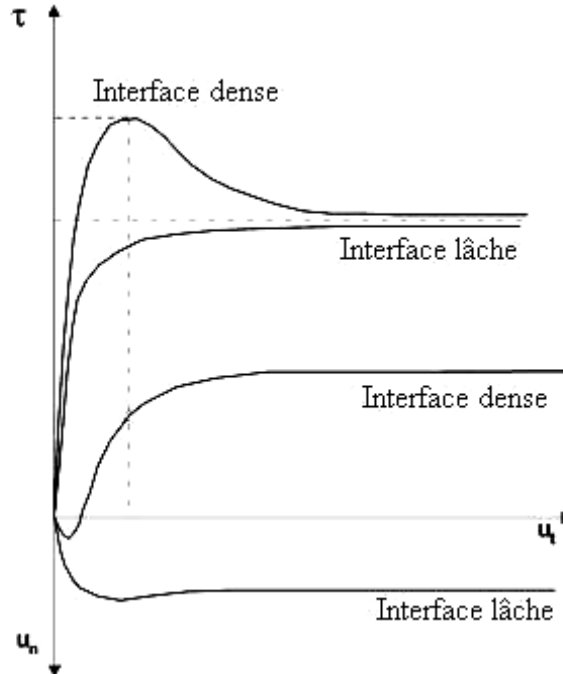


Figure I-2 Réponses mécaniques typiques de l'interface à CNC

C. Notion de coefficient de frottement

Lerat (1996) reprend la définition d'Alimi et al. (1977) sur le coefficient de frottement apparent μ^* défini par :

$$\mu^* = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0}$$

Où τ_{max} est la contrainte de cisaillement maximale et σ_0 est la contrainte normale initiale. Ce coefficient peut être fortement supérieur au coefficient de frottement réel μ :

$$\mu = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0 + \Delta\sigma(\tau_{max})} = \frac{\tau_{max}}{\sigma(\tau_{max})}$$

où $\Delta\sigma(\tau_{max})$ est l'accroissement de contrainte normale. Ceci est dû au phénomène de dilatance empêchée généré au sein de l'interface (Schlosser et Guilloux 1981).

D. Notion d'angle de frottement sol-structure

Parmi les facteurs qui ont une influence sur la valeur de l'angle de frottement sol-structure δ' , Schlosser (1991) cite :

- La rugosité de la structure,

- L'angle de frottement interne du sol ϕ' ,
- Le tassement relatif entre la structure et le sol.

La mesure du coefficient de frottement réel sol-structure ($\mu = \tau/\sigma_n$) détermine immédiatement la valeur absolue de l'angle δ' ($\delta' = \tan^{-1}(\mu)$). L'angle δ' peut varier entre 0 et ϕ' . Les praticiens fixent la valeur de δ' en fonction de ϕ' , en précisant la nature de la surface de contact : de lisse à rugueuse. La pratique française consiste à prendre pour l'angle δ' les valeurs : 0 pour une surface lisse, $1/3 \phi'$ pour une surface peu rugueuse, et $2/3 \phi'$ pour une surface rugueuse (Mestat et Prat 1999).

Brumund et Leonards (1973) et Bolton (1991) estiment que l'angle δ' peut être égal ou supérieur à celui du sol granulaire, si la taille des aspérités de la surface de la structure est supérieure au diamètre moyen des grains du sol "D50" ; en conséquence la surface de cisaillement se produit à l'intérieur de l'échantillon de sable. Yoshima et Kishida (1981) montrent que la rupture se produit à l'interface sol-pieu pour les sols granulaires, sauf si le pieu est très rugueux. Leland et Kraft (1990) suggèrent que pour un pieu en acier δ' / ϕ' est de 0,7 pour du sable silteux, alors que pour du sable calcaire le rapport devient égal à 0,6. Moormann (2002) affirme que pour une interface sol-béton rugueux, $\delta' = \phi'$.

Enfin, l'Eurocode 7 (2004) convient de limiter δ' à $2/3 \phi'$ dans le cas des ouvrages de soutènement préfabriqués pour les interfaces sol-béton et suggère $\delta' = \phi'$ quand l'ouvrage de soutènement est en béton coulé en place.

E. Epaisseur d'interface

La couche d'interface peut être visualisée au cours des essais au laboratoire à l'aide des photographies, radiographies, etc. L'épaisseur de la couche d'interface, qui se forme dans un milieu granulaire au contact avec un élément de structure, dépend essentiellement de la taille des grains, de la densité du matériau, de la rugosité de l'interface et des conditions aux limites extérieures.

Unterreiner (1994) affirme que l'épaisseur d'une couche d'interface n'est pas une caractéristique intrinsèque au sol et à l'interface, mais plutôt le résultat du problème aux limites étudié pour une géométrie donnée. Hassan (1995) a présenté l'étude la plus détaillée réalisée sur le comportement individuel des grains dans la zone d'interface (étude microscopique). En plus de la détermination de l'épaisseur de cette couche, les champs de déformation de l'échantillon et la rotation de quelques grains marqués ont été soigneusement examinés. L'auteur a constaté que l'épaisseur de la couche d'interface diminue avec la densité. Lerat (1996) a observé la couche d'interface en faisant simultanément des prises photographiques et vidéo. Il a montré clairement

Synthèse bibliographique

que l'épaisseur de la couche d'interface augmente pour des rugosités élevées. Plusieurs autres auteurs ont observé l'épaisseur de la couche d'interface pour différents types d'essais, de sol et de rugosité de structure. Ces études sont résumées dans le tableau I.2 (Frih 2005). L'épaisseur varie de 0-1 D₅₀ à 40 D₅₀.

Conditions d'essais			Epaisseur de la couche d'interface en fonction de D ₅₀	Source
Appareil	Etat de rugosité	Etat de compacité		
Cisaillement direct annulaire	lisse	lâche à dense	0-1	Yoshimi et Kishida (1981)
	rugueux	(D _r =40-90%)	5-8	
Cisaillement simple plan	lisse	dense (D _r =90%)	0-1	Uesugi et al. (1988)
	rugueux		5	
Cisaillement direct	lisse	Moyen à dense	0-1	Hoteit (1990)
	rugueux		5-10	
Silo en déformation plane	lisse	lâche à dense	10	Tejchman et Wei (1995)
	très rugueux	lâche	40	
	très rugueux	dense	30 à 40	
Cisaillement direct plan	lisse	lâche à dense	0-1	Hassan (1995)
	rugueux	lâche	6-7	
	rugueux	dense	4-5	
Cisaillement simple annulaire	lisse	lâche à dense	0-1	Lerat (1996)
	rugueux	lâche à dense	6-8	
Cisaillement simple annulaire	rugueux	lâche à dense	6-7	Chambon et al. (2004)

Tableau I-2 Synthèse des valeurs expérimentales sur l'épaisseur de la couche d'interface (Frih 2005)

I.1.2. Influence des différents paramètres sur le comportement de l'interface

Comme dans le cas du cisaillement d'un matériau granulaire, le cisaillement de l'interface sol-structure est influencé par la variation de quelques paramètres dont les plus importants sont la contrainte normale, la rugosité et la densité.

A. Influence de la contrainte normale:

La plupart des auteurs (Hassan 1995 ; Lerat 1996 ; Evgin et Fakharian 1996 ; De Gennaro 1999 ; Reddy et al. 2000 ; Ghionna et Mortara 2002 ; Hu et Pu 2004 ; Frih 2005 ; Dumitrescu 2005) constatent que la résistance au cisaillement augmente proportionnellement à l'augmentation de la contrainte normale imposée. Quant aux variations volumiques, les observations expérimentales montrent une contractance plus forte quand la contrainte normale initiale est élevée et une dilatance plus prononcée pour les contraintes normales les plus faibles (Fig. I.3). Pour une contrainte normale plus grande, la valeur de pic du coefficient de frottement apparent diminue et un déplacement tangentiel relatif plus important est requis pour mobiliser le pic de la contrainte de cisaillement (Fakharian et Evgin 1996). En revanche, la valeur résiduelle n'est pas influencée par la contrainte normale imposée (état souvent qualifié de "critique" ou à "volume constant").

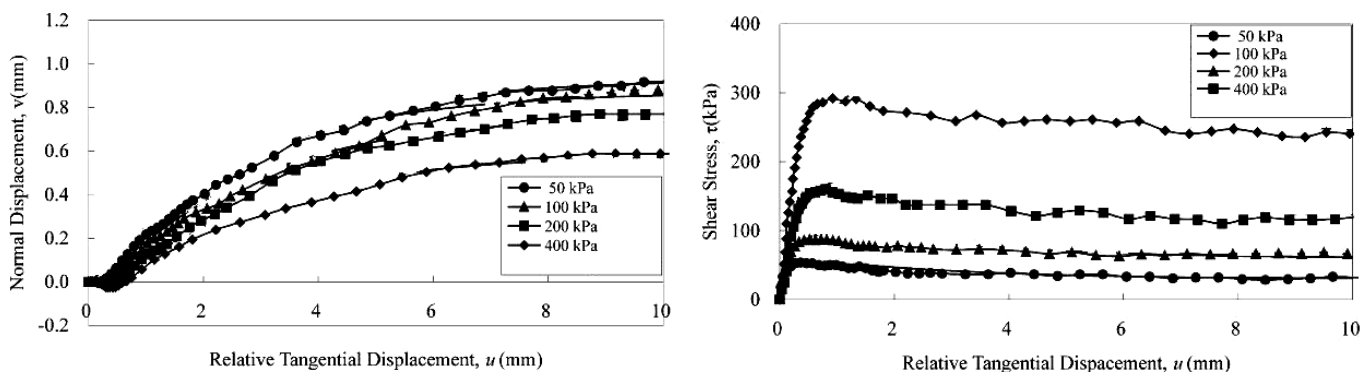


Figure I-3 Influence de la contrainte normale sur le comportement de l'interface sable dense-acier (Hu et Pu 2004)

B. Influence de la rugosité :

L'état de surface de la structure influe énormément sur le comportement de l'interface. La plupart des auteurs utilisent le concept de rugosité normalisée définie par :

$$R_n = \frac{R_{max} (L = D_{50})}{D_{50}}$$

Où le terme R_{max} est défini par Uesugi et Kishida (1986) comme étant la profondeur des aspérités sur une longueur L égale à D_{50} . Unterreiner (1994) a classé les surfaces des structures suivant l'échelle de rugosité notée R_p .

L'interface est dite lisse lorsque $R_p \approx 0$;

elle est rugueuse pour $\frac{D_{50}}{10} < R_p < \frac{D_{50}}{2}$

et très rugueuse quand $R_p > D_{50}$, R_p

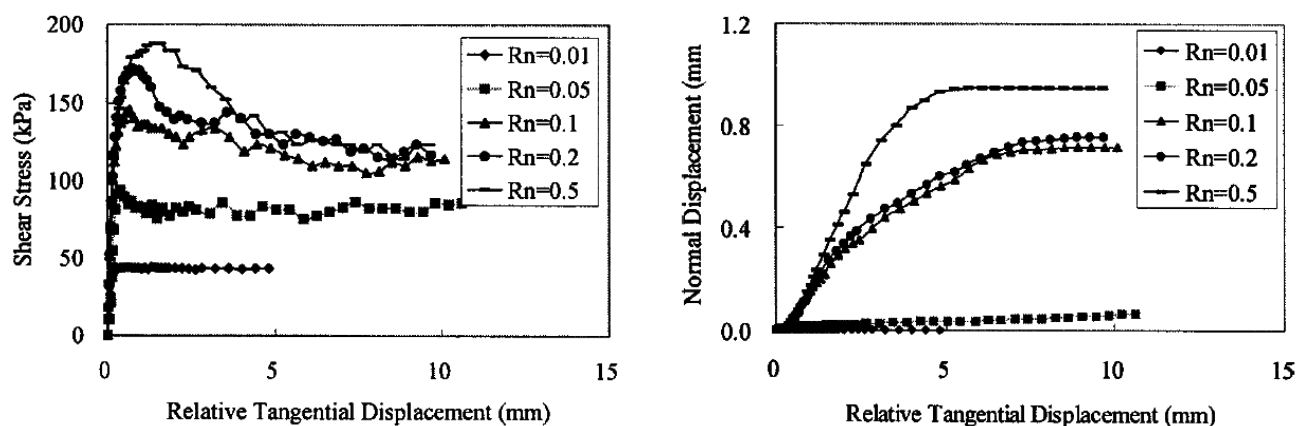
étant la différence entre le point le plus bas et le point le plus haut sur une surface de 2,5 mm de long.

Par ailleurs, Navayogarajah et al. (1992) ont défini la rugosité relative de l'interface qui varie entre 0 et 1 par analogie à la densité relative d'un sol. Ce paramètre est défini par le rapport entre la rugosité normalisée et la rugosité normalisée critique (Hassan 1995 ; Paikowsky et al. 1995 ; Reddy et al. 2000 ; Dove et Jarrett 2002). Si la rugosité normalisée augmente, la valeur du pic ainsi que la valeur résiduelle de la résistance au cisaillement deviennent plus importantes. De plus, Hu et Pu (2004) ont montré qu'il existe deux modes de rupture dus à la différence de rugosité : un mode élastique parfaitement plastique quand $R_n < 0,1$ (interface lisse) et un mode avec pic et radoucissement quand $R_n > 0,1$ (interface rugueuse) (Fig. I.4).

Cependant, Dumitrescu (2005) observe le pic même pour l'interface lisse mais c'est un pic atteint plus rapidement que pour la surface rugueuse, fait confirmé par Junaiden et al. (2004). De plus, Dumitrescu (2005) montre que l'influence de la rugosité est d'autant plus prononcée dans le cas d'un sable dense. En effet, l'enchevêtrement entre les grains et les aspérités de l'inclusion confèrent une résistance supplémentaire par rapport à l'interface lisse, phénomène expliqué aussi par Schlosser et Guilloux (1981).

En ce qui concerne les déformations volumiques, la plupart des observations expérimentales ont montré que plus la structure est rugueuse, plus les variations volumiques sont importantes (Hoteit 1990 ; Boutrif 1993 ; Hassan 1995 ; Fakharian et Evgin 1996 ; Lerat 1996 ; Dumitrescu 2005). De plus, un comportement essentiellement contractant est observé pour l'interface lisse et contractante dilatant pour l'interface rugueuse. La contractance maximale est

plus importante pour l'interface lisse. A l'ACSA, pour l'interface rugueuse, un deuxième comportement contractant a lieu après le comportement dilatant (Lerat 1996 ; Chambon 2003 ;



Frih 2005 ; Dumitrescu 2005).

**Figure I-4 Influence de la rugosité sur le comportement de l'interface sable dense – acier
(Hu et Pu 2004)**

C. Influence de la densité relative de l'échantillon :

L'effet de la densité du sable sur le comportement de l'interface est bien connu. Les valeurs de résistance au cisaillement augmentent pour les échantillons avec sables plus denses en conséquence de la dilatance, phénomène d'enchevêtrement et de désenchevêtrement des grains lors du cisaillement d'interface (Wernick 1978 ; Teichman et Wu 1995). Les courbes de cisaillement pour les échantillons lâches montrent l'absence d'un pic prononcé. Ce dernier, présent dans les échantillons denses, est suivi par un radoucissement progressif et une stabilisation de la valeur de cisaillement résiduel. Du point de vue volumique, la courbe du déplacement normal des échantillons denses est caractérisée par une phase contractante très courte suivie par une phase dilatante et enfin une stabilisation (Tabucanon et Airey 1992 ; Fakharian et Evgin 1996) et éventuellement une deuxième phase contractante (Lerat 1996 ; Frih 2005 ; Dumitrescu 2005) (Fig. I.5). Par contre, la courbe des échantillons lâches se caractérise par une seule longue phase de contractance globale ; la diminution du volume est continue et proportionnelle à la distance de cisaillement et à la baisse de l'indice de densité ID.

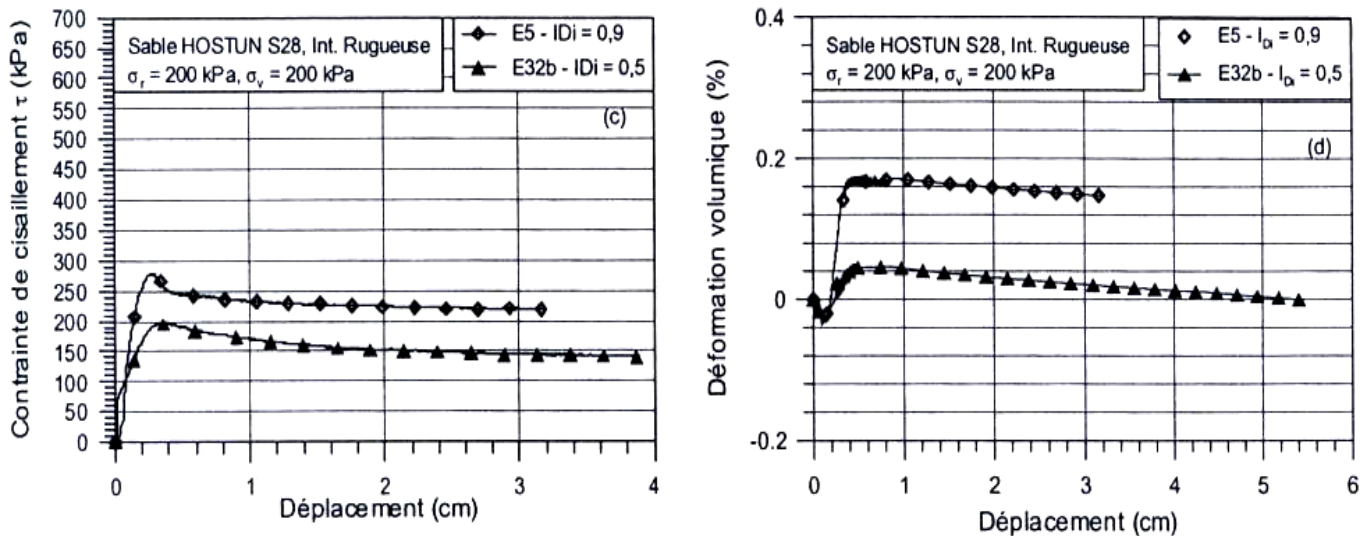


Figure I-5 Influence de la densité sur le comportement de l'interface sable d'Hostun-acier rugueux à l'ACSA (Dumitrescu 2005)

I.2. Modélisation du comportement de l'interface :

A cause du caractère particulier des interfaces, plusieurs types de modèles ont été proposés. Le matériau d'interface a été supposé élastique linéaire (Beer 1985 ; Bhatia et Bakeer 1989 ; Yuan et Chua 1992) ou élastique non linéaire avec une relation contrainte déformation de type hyperbolique dans les directions normale et tangentielle de la déformation (Clough et Duncan 1971 ; Carol et Alonso 1983 ; Desai et al. 1984 ; Varadarajan et Sharma 1989 ; Boulon et al. 1995b ; Drumm et al. 2000). D'autres études font référence au cadre théorique de l'élastoplasticité.

Citons d'abord les modèles élastiques parfaitement plastiques qui ont été proposés pour l'interface en s'appuyant sur l'analogie avec le comportement des joints rocheux. Des modèles plus complexes ont également été proposés pour décrire le comportement de l'interface. Ces modèles incorporent un ou plusieurs des phénomènes suivants : l'écrouissage, le radoucissement, la contractance, la dilatance, l'endommagement. Dans ce qui suit, on fait état de l'art de quelques modèles élastoplastiques d'interface bidimensionnels, puis tridimensionnels.

I.2.1. Modèles élastoplastiques bidimensionnels

L'interface sépare en général la surface de la structure et la surface du sol. Ces surfaces sont représentées généralement par des plans parallèles. La couche d'interface d'épaisseur t est identifiable expérimentalement par observation directe, la définition de son épaisseur est très variable en fonction des caractéristiques du sol et de l'inclusion (cf. § I.1.1.E), ce qui modifie de manière importante les caractéristiques du comportement observé. De ce fait, les chercheurs évitent de formuler les lois d'interfaces en fonction des déformations (distorsion :

$$\gamma_t = \frac{u_t}{t} \quad , \quad \text{ou déformation normale :} \quad \varepsilon_n = \frac{u_n}{t}$$

car elles dépendent de l'épaisseur de l'interface, alors que les grandeurs cinématiques mesurables sont le déplacement normal relatif, u_n ou tangentiel relatif, u_t de l'interface.

La modélisation bidimensionnelle impose donc l'utilisation des quatre variables suivantes : τ , σ_n , u_t , u_n . En général, les modèles utilisés prévoient une partie élastique caractérisée par une relation incrémentale entre les déplacements relatifs et les contraintes de la forme :

$$\begin{pmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{pmatrix} = \underline{\underline{K}} \begin{pmatrix} du_n^e \\ du_t^e \end{pmatrix} \text{ avec } \underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix}$$

K_n et K_t sont respectivement la rigidité normale et tangentielle qui peuvent être déterminés à partir d'essais en laboratoire (Karabatakis et Hatzigogos 2001) suivant les équations :

$$K_n = \frac{d\sigma_n}{du_n}$$

$$K_t = \frac{d\tau}{du_t}$$

A. Modèle élastique parfaitement plastique :

Historiquement, la première utilisation des interfaces a concerné des analyses des joints rocheux. Pour reproduire le comportement des joints rocheux et des interfaces, la plupart des auteurs ont considéré des modèles linéaires élastiques parfaitement plastiques utilisant le critère de rupture par cisaillement de Mohr-Coulomb comme surface de charge.

Les auteurs qui ont étudié les fractures des roches (Patton 1966 ; Goodman et Dubois 1972 ; Goodman 1989) ont considéré l'influence de la rugosité des joints. En effet, l'angle de frottement d'un joint rugueux dont la surface des aspérités est inclinée d'un angle i est égal à $\phi' + i$. D'autre part, l'abrasion progressive des aspérités est à l'origine d'une stabilisation à une valeur résiduelle de la contrainte de cisaillement pour les grands déplacements ce qui correspond à un angle de frottement résiduel ϕ'_r (Fig. I.6 a). Le critère de rupture est donc défini par une enveloppe bilinéaire. D'autres auteurs comme (Goodman et al. 1968 ; Pande et Sharma 1979 ;

Lee et al. 1992 ; Day et Potts 1994 ; Day et Potts 1998) ont adopté un critère de rupture de Mohr-Coulomb plus simple (Fig. I.6 b) avec une règle d'écoulement associée qui définit la fonction de charge F :

$$F = |\tau| + \sigma_n \tan \phi' - c'$$

Dans ce cas, lorsque la contrainte de cisaillement τ atteint la limite de rupture de Mohr-Coulomb, la valeur de la rigidité tangentielle devient nulle ; la rigidité normale reste la même. Par ailleurs, une règle d'écoulement non associée a aussi été utilisée pour éviter une surestimation de la dilatance plastique en considérant un angle de dilatance différent de l'angle de frottement (Van Langen et Vermeer 1991). Dans ce cas, le potentiel plastique s'écrit :

$$Q = |\tau| + \sigma_n \tan \psi$$

avec ψ : angle de dilatance. Lorsque ce critère est restreint à une direction, il est dit critère orienté (Frank et al. 1982 ; Mestat 1993 ; De Gennaro 1999 ; De Gennaro et Frank 2005). Il y a glissement entre le sol et la structure lorsque le critère est atteint. Dans ce cas, seuls les déplacements à l'interface deviennent discontinus. On peut aussi introduire un critère de décollement entre la structure et le sol atteint lorsque la contrainte normale à l'interface est égale à une valeur limite. Les modèles élastoplastiques parfaits ne permettent pas de reproduire de manière adéquate les réponses typiques mécaniques de l'interface observées expérimentalement notamment :

l'écrouissage progressif et le changement de phase (contractance-dilatance).

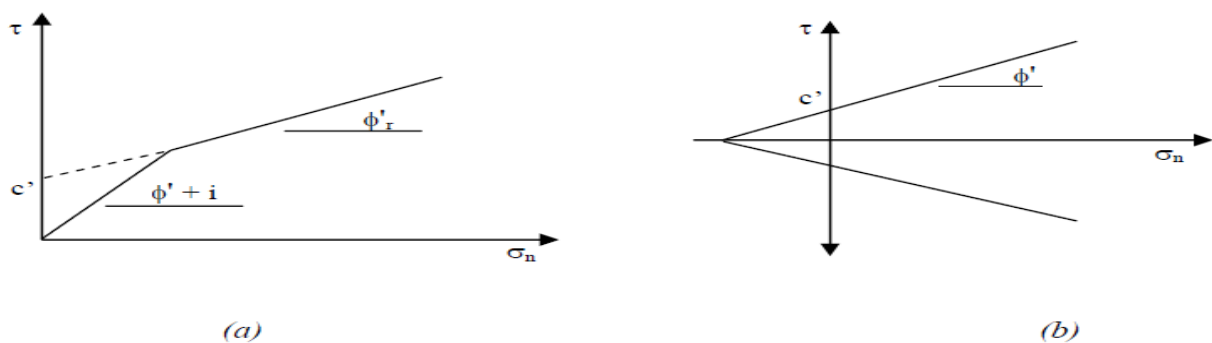


Figure I-6 Critère de rupture de Mohr-Coulomb (a) Enveloppe bilinéaire pour les joints tenant compte des aspérités (Goodman 1989) (b) Enveloppe linéaire pour les interfaces

B. Modèles élastoplastiques avec écoulement :

Divers modèles élastoplastiques avec écoulement ont été présentés dans la littérature. On considère d'abord les modèles d'interface sol-structure dans le cadre de l'élastoplasticité classique. Dans ce cas, les analyses des résultats expérimentaux dérivés de l'essai triaxial et de la boîte de cisaillement direct montrent de fortes similarités (Fig. I.7). De ce fait, il est clair qu'une loi de comportement d'interface peut employer la même structure que la loi qui caractérise le matériau constituant l'interface, à condition qu'une substitution adéquate des variables soit faite (Tab. I.3). Comme conséquence de ces analogies, Boulon et Nova (1990) ont adapté pour les interfaces un modèle élastoplastique qui a été formulé auparavant pour le comportement triaxial des sables (Nova et Wood 1978).

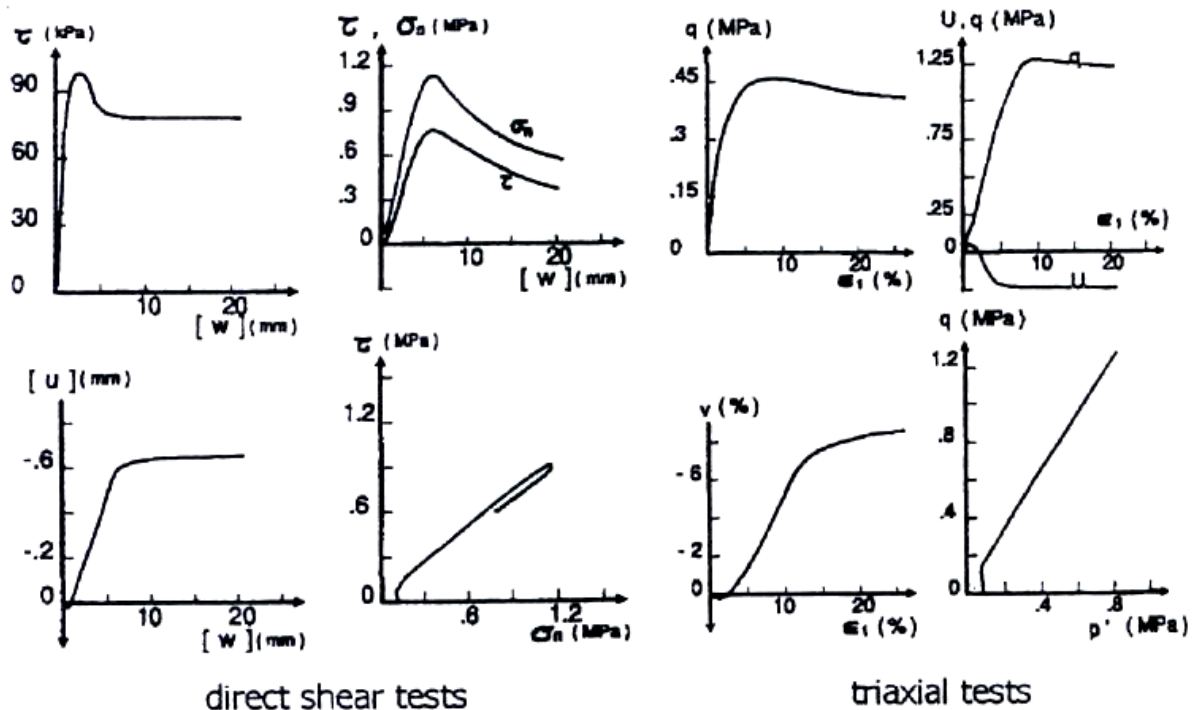


Figure I-7 Analogies dans le comportement observé à l'essai triaxial et l'essai de cisaillement direct pour les sables (Boulon et Nova 1990)

Test	Analogies			
Triaxial	ε_v	ε_a	p'	q
Direct shear	$[u_n]$	$[u_t]$	σ_n	τ

Tableau I-3 Analogies entre l'essai triaxial et l'essai de cisaillement direct (d'après Boulon et Nova 1990)

Gens et al. (1990) ont représenté le comportement de l'interface pour les joints en utilisant un modèle élastoplastiques non associé avec variation de la dilatance en fonction du niveau des contraintes et déformations. Boulon et Jarzebowski (1991) ont formulé un modèle élastoplastiques basé sur le concept de surface frontière en utilisant une fonction plastique elliptique. La même approche a été utilisée par Shahrour et Rezaie (1997) pour l'étude du comportement de l'interface sous chargements cycliques.

L'un des modèles les plus connus développé pour les joints et les interfaces est le modèle HISS (HIERarchical Single Surface) développé par Desai et Fishman (1991). Le modèle est dérivé du modèle généralisé développé pour les solides (Desai 1980 ; Desai et Faruque 1984 ; Desai et al. 1985) et exprimé en invariants en faisant des analogies des composantes de contrainte et de déformation. Il est caractérisé par : une surface de charge fermée décrite avec une seule fonction de charge F continue, une fonction d'écrouissage qui s'écrit en fonction des déplacements tangentiels et normaux plastiques, l'état ultime de rupture défini par l'enveloppe des valeurs asymptotiques des contraintes, la non associativité des déformations plastiques, la reproduction de la dilatance et l'effet de variation de l'angle des aspérités des joints. L'avantage majeur de ce modèle est que c'est un cas particulier du modèle généralisé pour les solides ; ceci permet de modéliser les discontinuités (joints) et la masse solide (roche) avec le même modèle. D'autre part, Mortara (2001) comme Ghionna et Mortara (2002) ont formulé un modèle d'interface élastoplastique basé sur une règle d'écoulement non associée.

Le potentiel plastique a une forme similaire à celle du modèle de Cam Clay, mais diffère suivant la condition d'écrouissage ou de radoucissement. Le choix du potentiel plastique dérive de la relation contrainte-dilatance en deux droites sécantes qui est une caractéristique essentielle du modèle et qui explique que initialement le sol se déforme dans la hauteur et puis une forte localisation de déformation tangentielle se produit à l'interface. Le modèle peut être validé par l'essai de cisaillement direct à rigidité normale constante à chargement monotone et cyclique. Zeghal et Edil (2002) ont développé un modèle d'interface basé sur le modèle de Mohr Coulomb, sur une plasticité non associée avec un écrouissage-radoucissement qui dépend du travail plastique.

Cependant, le modèle a l'originalité de considérer l'interface comme une surface sinusoïdale, et de tenir compte de la dégradation des grains d'interface à travers une corrélation entre le coefficient de frottement et le travail plastique (variable d'écrouissage).

De Gennaro et Frank (2002a, 2004, 2005) ont proposé un modèle élastoplastique de type critère de Mohr-Coulomb avec prise en compte d'un écrouissage déviatorique positif et du

Synthèse bibliographique

radoucissement, modélisation de l'état caractéristique et de l'état critique aux grands déplacements. Ce modèle sera développé en détail plus loin.

Par ailleurs, beaucoup de modèles d'endommagement ont été développés (Navayogarajah et al. 1992 ; Hu et Pu 2003 ; Hu et Pu 2004). Ces auteurs supposent que la réponse de l'interface est la somme d'une partie intacte et d'une partie endommagée à l'état critique, en s'appuyant sur le concept d'état perturbé "DSC: Disturbed State Concept" (Desai et Ma 1992 ; Desai et Rigby 1995 ; Desai et Zhang 1998 ; Liu et al. 2006). En effet, durant le cisaillement des grains, la partie intacte se transforme progressivement en une partie endommagée à cause de l'accumulation des déformations plastiques. La contrainte de cisaillement est nulle dans la partie endommagée alors que la contrainte normale n'est pas influencée par l'endommagement. Pour cela une fonction d'endommagement a été introduite pour reproduire le phénomène de radoucissement et de dilatance. Navayogarajah et al. (1992) ont, de plus, considéré l'effet de la rugosité dans le modèle en faisant dépendre le coefficient de frottement ainsi que la valeur de déplacement tangentiel plastique au pic de cisaillement, de la rugosité relative R_p définie au paragraphe

.

Synthèse bibliographique

Tableau I-4 Résumé des modèles constitutifs élastoplastiques récents d'interface

Source	Fonction de charge Potentiel plastique	Variable d'écrouissage	Type d'interface	Nbre param
Desai et Fishman (1991)	$F = \tau^2 + \alpha \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$ $Q = F + h(\sigma_n, \xi)$	$\xi = \int \left((du_n^p)^2 + (du_t^p)^2 \right)^{1/2}$	Joints rocheux	7
Navayogarajah et al. (1992)	$F = \tau^2 + \alpha \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$ $Q = \tau^2 + \alpha_Q \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$	$\xi_D = \int du_t^p $ $\xi_V = \int du_n^p $	Interface sable-acier	15
Desai et Ma (1992)	$F = Q = \tau^2 + \alpha \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$	$\xi = \int \left(du_n^p du_n^p + du_t^p du_t^p \right)^{1/2}$	- Joints rocheux - interface roche-béton	15
De Gennaro (1999) De Gennaro et Frank (2002a) De Gennaro et Frank (2005)	$F = \tau - \mu(u_t^p) \sigma_n$ $Q = \tau + \mu_c(u_t^p) \sigma_n \ln \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_o} \right)$	u_t^p	Interface sable-structure	10
Mortara (2001) Ghionna et Mortara (2002)	$F = \tau - \alpha \sigma_n^\beta$ $Q = \tau - \frac{b}{1+a} \sigma_n \left[1 + a \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) - \frac{1-a}{a} \right]$	$w_n = \int \frac{\dot{w}^p}{w_p}$	Interface sable-aluminium	12
Wang et al (2002)	$F = Q = \frac{(\sigma_n - \gamma H)}{C} + \frac{\tau_{sn}^2}{B \alpha^2(\theta)} - H^2$	$h = m_1 + m_2 [u_n] + m_3 [u_t] \alpha(\theta)$	Joints et interfaces rocheuses	17
Zeghal et Edil (2002)	$F = T + \mu \Sigma$ $T = (\sigma_n \sin \alpha_k + \tau \cos \alpha_k)$ $\Sigma = (\sigma_n \cos \alpha_k - \tau \sin \alpha_k)$ $Q = T $	travail plastique W^p	Interface sable-structure	6
Hu et Pu (2003)	$F = \frac{\tau^i}{D_\tau} + \varepsilon_\tau^p (\tau^i - \sigma_n \tan \delta_0)$ $F = \tau^c - \sigma_n \tan \delta_\tau$ $Q = \tau^i$	ε_τ^p	Interface sol-structure rugueuse	9
Fakharian et Evgin (2000) Modèle dit "tridimensionnel"	$F = \tau_x^2 + \tau_y^2 + \alpha \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$ $Q = \tau_x^2 + \tau_y^2 + \alpha_Q \sigma_n^n - \gamma \sigma_n^2$	$\xi_D = \int du_t^p $ $\xi_V = \int du_n^p $	Interface sable-acier	15

tableau I.4 résume les fonctions de charge, les potentiels plastiques ainsi que les variables d'écrouissage utilisées dans quelques modèles élastoplastiques d'interface.

Enfin, citons les modèles incrémentaux dont le principe est d'obtenir la réponse incrémentale à un chargement incrémental quelconque par interpolation rhéologique à partir d'un ensemble de sollicitations définies expérimentalement et formulées analytiquement par l'intermédiaire de fonctions d'interpolation (Boulon 1988 ; Boulon 1989 ; Boulon 1991 ; Garnica-Anguas 1993 ; Rouainia et al. 1992). Dans l'espace des sollicitations incrémentales (λ , μ), tous les chemins possibles sont les points du cercle unité (Fig. I.8).

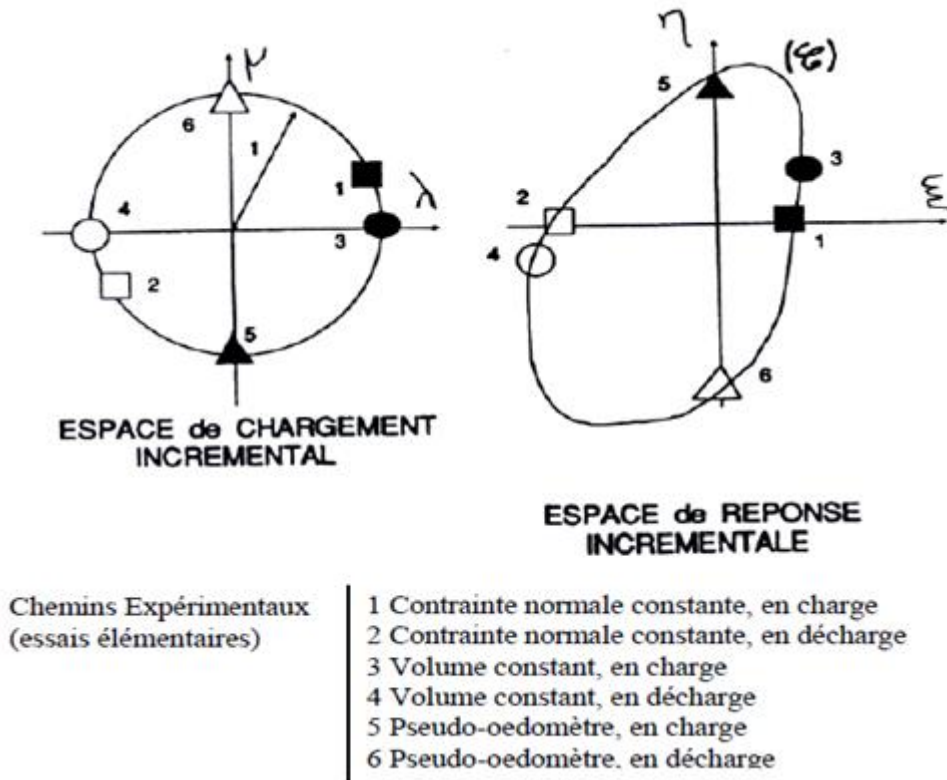


Figure I-8. chargement incrémentale et réponse incrémentale (Boulon 1991)

I.2.2. Modèles élastoplastiques tridimensionnels

Le seul modèle dit "tridimensionnel" d'interface disponible dans la littérature est celui développé par Fakharian et Evgin (2000) en s'appuyant sur Desai et Fishman (1991). Alors que la modélisation bidimensionnelle impose l'utilisation des variables τ , σ_n , u_t , u_n , le modèle tridimensionnel de Fakharian et Evgin considère les variables τ_x , τ_y , σ_n , u_x , u_y , u_n (Fig. I.9). Le comportement élastique est décrit par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau_x \\ d\tau_y \end{bmatrix} = \underline{\underline{K}} \begin{bmatrix} dv^e \\ du_x^e \\ du_y^e \end{bmatrix} \text{ avec } \underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & K_{sy} \end{bmatrix}$$

K_n , K_{sx} et K_{sy} sont respectivement la rigidité élastique normale dans la direction z , la rigidité élastique de cisaillement dans la direction x et la rigidité élastique de cisaillement dans la direction y . Les auteurs admettent par hypothèse que les comportements élastiques normal et tangentiel ne sont pas couplés et que $K_{sx} = K_{sy}$. Le modèle est basé sur la formulation bidimensionnelle de Navayogarajah et al. (1992) mais considère en plus le cisaillement dans les deux directions du plan de l'interface. La fonction de charge et le potentiel plastique sont donnés dans le tableau I.4. L'objectif de la modélisation est de pouvoir reproduire le comportement de l'interface à l'appareil tridimensionnel cyclique de cisaillement simple d'interface C3DSSI capable de mener des essais à contrainte normale constante ou à rigidité normale constante. Le modèle est capable de simuler la non associativité, le radoucissement, l'influence de la rugosité de l'interface et de reproduire, avec succès, des essais d'interface entre le sable et l'acier avec des chemins de contrainte tridimensionnels (en considérant le cisaillement dans les deux directions orthogonales).

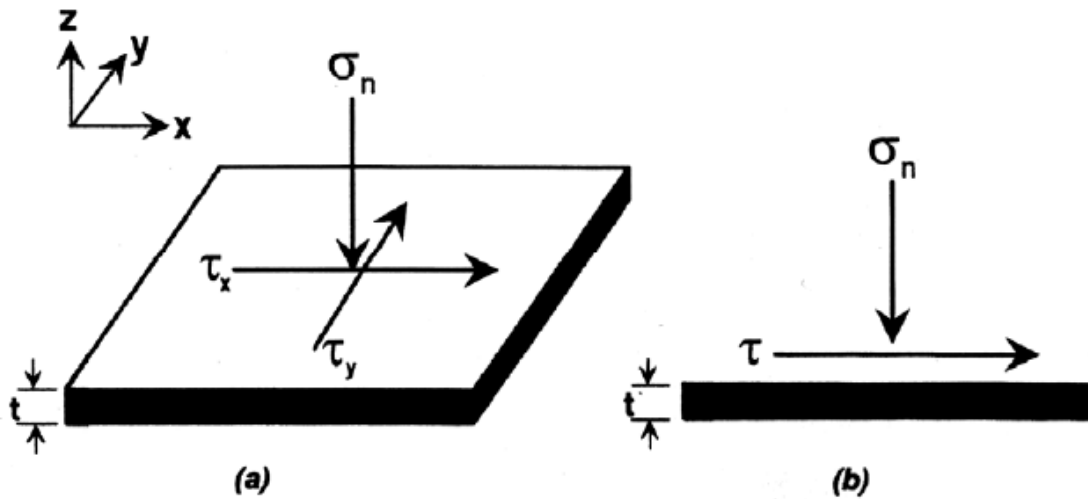


Figure I-9 Contraintes agissant sur l'interface : (a) cas tridimensionnel, (b) cas bidimensionnel (Fakharian et Evgin 2000)

I.2.3. Discrétisation par éléments finis du problème de contact en géotechnique :

Pour les ouvrages géotechniques, la modélisation des contacts par éléments finis est une opération délicate, à cause des grandes dimensions que présentent les surfaces de contact et de la dilatance de l'interface au cours du cisaillement. Même dans le cas où on négligerait la dilatance, la programmation des algorithmes de résolution des éléments de contact demeure difficile (Zheng et al. 2004). Une étape importante dans la simulation du comportement de l'interface concerne la représentation de l'élément d'interface souvent sous forme d'éléments spéciaux par la méthode des éléments finis. Dans une interaction sol-structure, le mouvement relatif entre le sol et la structure peut se produire. L'utilisation d'éléments continus habituels, avec compatibilité des déplacements, empêche le mouvement relatif entre le sol et la structure (Fig. I.10 a). La compatibilité nodale de la méthode des éléments finis oblige le sol et la structure à se déplacer ensemble. C'est pour cela que des éléments d'interface spéciaux sont utilisés. Les avantages principaux de l'utilisation des éléments d'interface sont la possibilité de faire varier le comportement constitutif de l'interface et de permettre le mouvement relatif entre le sol et la structure. Dans ce cadre, beaucoup de méthodes ont été utilisées pour modéliser le comportement discontinu de l'interface sol-structure. Citons l'utilisation d'éléments sans épaisseur (Fig. I.10 b et c), les éléments de type couche mince (Fig. I.10 d) et les méthodes hybrides où sol et structure sont modélisés séparément et liés ensuite par des équations de compatibilité de différentes natures pour les forces et les déplacements.

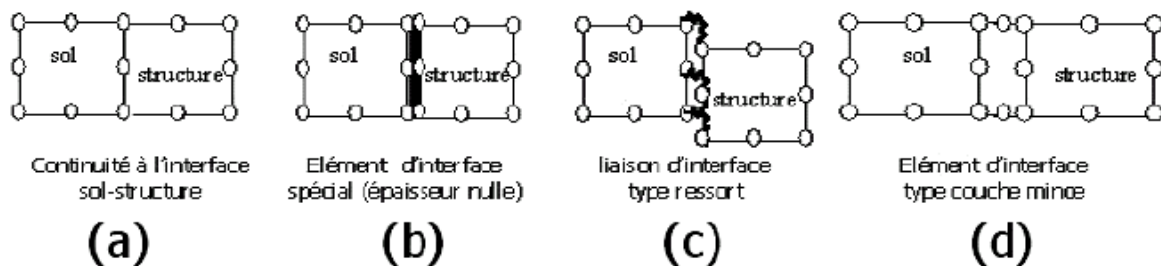


Figure I-10 Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure

(Potts et Zdravkovic 1999; Potts et al. 2002)

A. Éléments sans épaisseur :

Les éléments sans épaisseur sont aussi appelés éléments joints ou "zero thickness elements". Ils ont été initialement développés par Goodman et al. (1968) présentant 4 nœuds, 8 degrés de liberté et nommés "GTB". Ces éléments ont subi plusieurs améliorations (Ghamboussi et al. 1973 ; Carol et Alonso 1983 ; Desai et al. 1984 ; Beer 1985 ; Gens et al. 1989 ; Van Langen et Vermeer 1991 ; Kaliakin et al. 1995 ; Day et Potts 1994 ; Boulon et al. 1995b ; Day et Potts 1998 ; Potts et al. 2002). Pour ces éléments, les déplacements relatifs entre les nœuds sont les

principales variables de déformation. Les déplacements relatifs sont reliés aux déplacements absolus en utilisant la matrice des fonctions d'interpolation. Il s'agit d'associer à chaque nœud d'un milieu, son homologue de l'autre milieu. Une utilisation de ces éléments consiste à considérer les liaisons ressorts qui se résument à des connexions entre les nœuds opposés (Hermann 1978 ; Frank et al. 1982 ; Coutinho et al. 2003). Ces auteurs ont dédoublé les points de contact entre les deux milieux et ont muni chaque doublet de deux ressorts fictifs (l'un tangentiel, l'autre normal à la surface de contact) (Fig. I.11). Dans ce cas, les déplacements relatifs sont exprimés en fonction des déplacements absolus, par une matrice dont tous les termes sont nuls sauf ceux qui indiquent l'existence du ressort tangentiel ou normal. Les éléments développés par Hermann sont appelés "LRH". L'élément qui combine les avantages des éléments GTB (Goodman et al. 1968) et LRH (Hermann 1978) est appelé "macroélément" (LK1) et est constitué de deux éléments GTB (Fig. I.12) (Kaliakin et Li 1995).

En général, la méthode de résolution des éléments sans épaisseur consiste à appliquer une méthode d'adaptation des rigidités ; le glissement est obtenu en donnant une valeur très faible à la rigidité tangentielle si la contrainte de cisaillement franchit le seuil donné par un critère de frottement. Par ailleurs, si la contrainte normale est de traction, les deux rigidités (tangentielle et normale) sont annulées afin de rendre compte d'un décollement à l'interface. Certains défauts associés aux éléments sans épaisseur ont été signalés, notamment en termes d'effort normal à l'interface (Sharma et Desai 1992). Le problème des points plastiques singuliers a également été abordé (Van Langen et Vermeer 1991). D'autres auteurs qui ont utilisé des éléments d'interface sans épaisseur (Day et Potts 1994, 1998), ont noté des problèmes de conditionnement numérique lorsque K_n et K_t dépassent $100 E$ (E module d'Young du sol adjacent). De plus, lorsqu'il y a un grand changement dans la matrice de rigidité dû à l'utilisation d'une interface non dilatante, des problèmes dans la convergence peuvent subvenir dans le cas d'une solution de type Newton-Raphson pour laquelle la matrice de rigidité élastique est considérée constante ; dans ce cas, les auteurs préconisent l'utilisation d'une rigidité élastoplastique tangente à chaque étape de l'analyse, ce qui accélérerait la convergence.

L'utilisation des points d'intégration de Gauss peut aussi causer des problèmes numériques liés au fait que le déplacement relatif des nœuds affecte la contrainte en chaque point d'intégration qui est différent des nœuds ; ce problème peut être évité avec la méthode d'intégration de Newton Cotes où les points d'intégrations coïncident avec les nœuds. D'autre part, l'épaisseur nulle peut entraîner des singularités numériques dans le comportement de l'élément ; ceci peut être évité en lui attribuant, pour le calcul, une épaisseur très faible (Mestat 2001). D'autres auteurs comme Schellekens et De Borst (1993) ont étendu l'approche de

Goodman et al. (1968) pour formuler une interface quadrilatère pour les analyses tridimensionnelles.

Enfin, Bouzid et al. (2004) ont développé un élément d'interface axisymétrique à épaisseur nulle dont la formulation est compatible avec l'élément triangulaire à 6 nœuds et rectangulaire à 8 nœuds et prend en compte l'inclinaison de l'interface.

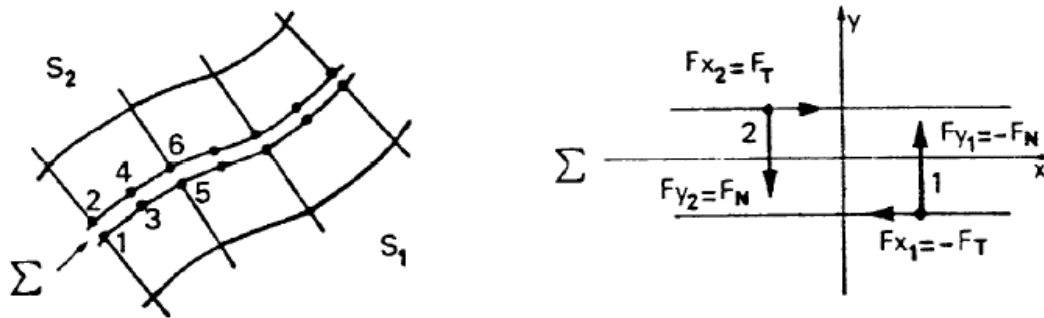


Figure I-11 (a) Surface de discontinuité (b) Eléments d'interface à deux nœuds (Frank et al. 1982)

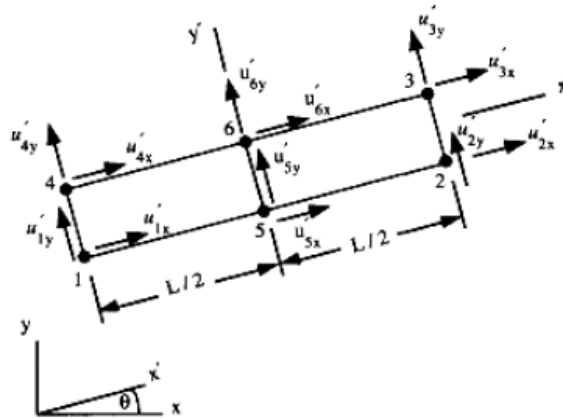


Figure I-12 Élément sans épaisseur (LK1) combinant les avantages des GTB et des LRH composé de deux éléments GTB (Kaliakin et Li 1995)

B. Éléments couche mince :

Le concept de couche mince ou "thin layer element" a été abordé par Desai et al. (1984) qui ont considéré que la réponse de l'interface devrait être traitée par un modèle constitutif approprié. La formulation de l'élément type couche mince est basée sur l'hypothèse que l'interface peut être remplacée par un élément de massif équivalent avec une petite épaisseur et une loi constitutive spéciale. L'utilisation de l'élément couche mince est longuement traité dans la littérature (Pande et Sharma 1979 ; Zaman 1985 ; Desai et Ma 1992 ; Sharma et Desai 1992 ; Hohberg et Schweiger 1992 ; Ng et al. 1997 ; De Gennaro 1999 ; Karabataakis et Hatzigogos 2001 ; De Gennaro et Frank 2005).

Le problème de contact est modélisé en utilisant des éléments finis de massif isoparamétriques (Fig. I.13). Dans le cas bidimensionnel, les éléments type couche mince isoparamétriques les plus classiques sont à 8 nœuds, et ont pour degrés de liberté les déplacements relatifs entre le sol et la structure. L'élément présente quatre points d'intégration de Gauss. Une approche de type couche mince est adoptée par Frank et al. (1982) associant à l'élément un modèle de comportement élastoplastique parfait avec un critère orienté dans une direction α . La direction des discontinuités α est imposée et est constante (Fig. I.14 a). Le critère de plasticité adopté est celui de Mohr Coulomb. Ce critère relie à la rupture la contrainte normale σ_n et la contrainte tangentielle τ de l'élément d'interface. Ces deux composantes sont obtenues en accord avec (I-6) et (I-7), en écrivant les vecteurs contraintes et déformations dans le repère local en fonction des contraintes et déformations dans le repère global. D'autres auteurs ont considéré cette approche pour simuler l'interface (Sharma et Desai 1992 ; De Gennaro 1999 ; De Gennaro et Frank 2005)

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & -2 \sin \alpha \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad \text{I-6}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_n \\ \gamma_t \end{bmatrix} = \mathbf{T}_\varepsilon \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{T}_\varepsilon = \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha \\ -2 \cos \alpha \sin \alpha & 2 \cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad \text{I-7}$$

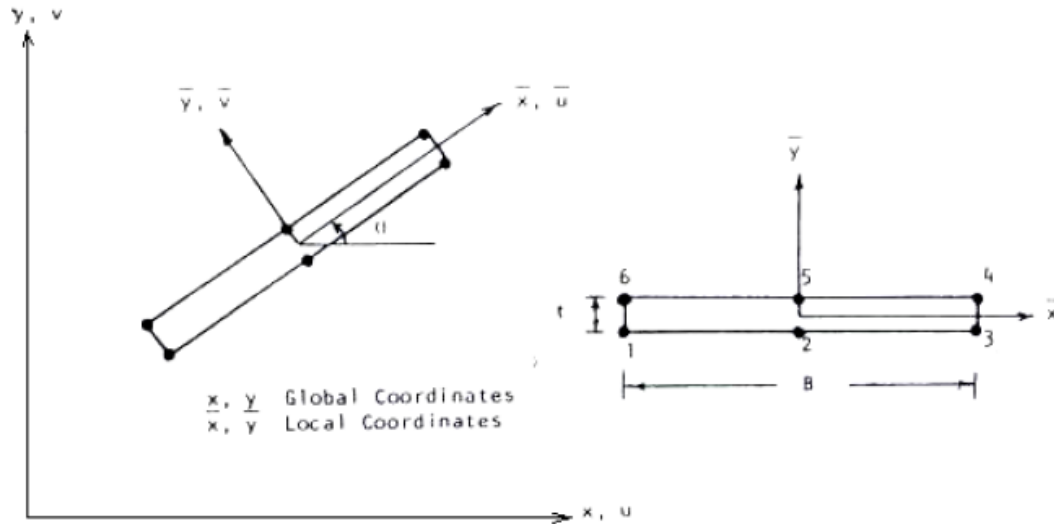


Figure I-13 Élément couche mince à 6 nœuds (Sharma et Desai 1992)

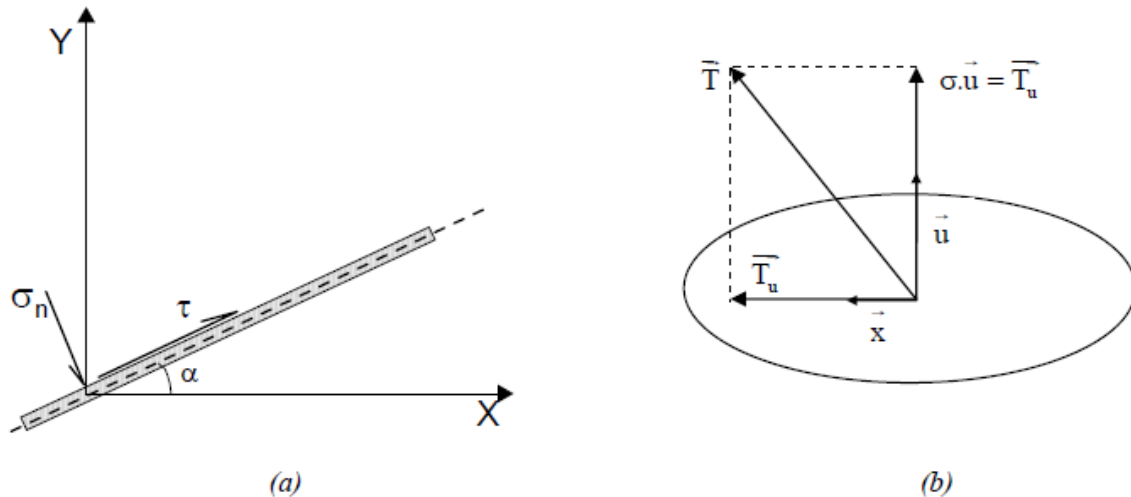


Figure I-14 Critère orienté utilisé pour l'interface couche mince (a) cas bidimensionnel (b) cas tridimensionnel (Frank et al. 1982)

I.2.4. Détails sur la mise en œuvre numérique de l'élément d'interface couche mince :

Pour adapter les éléments finis type couche mince à la description du comportement mécanique de l'interface, l'élément doit permettre de simuler le mécanisme de cisaillement en considérant les contraintes normales et tangentes à l'interface. D'autre part, la loi de comportement associée à l'élément doit permettre de relier ces contraintes à l'interface aux déplacements associés. L'avantage des éléments couche mince est de pouvoir utiliser des éléments finis standard. Cependant, des considérations particulières doivent être accordées à ces éléments, notamment en ce qui concerne les valeurs du rapport de forme L/t (Fig. I.15).

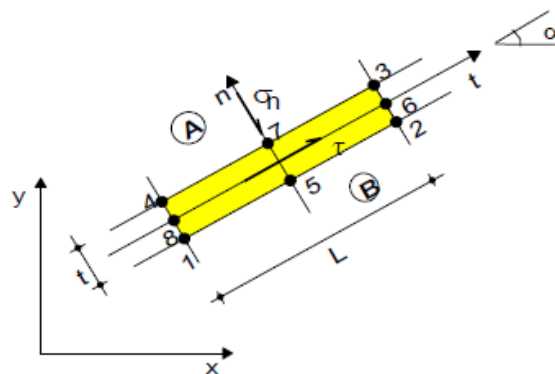


Figure I-15 Élément d'interface isoparamétrique à 8 nœuds (De Gennaro et Frank 2005)

A. Notion de rapport de forme :

Considérons l'élément d'interface bidimensionnel couche mince à 8 nœuds d'épaisseur t et longueur L (Fig. I.15). Plusieurs auteurs (Pande et Sharma 1979 ; Desai et al. 1984 ; Sharma

et Desai 1992) ont montré que la performance des éléments couche mince dépend de son épaisseur. Ces auteurs présentent une étude paramétrique détaillée qui concerne l'influence de l'épaisseur de l'élément d'interface sur le résultat des calculs. Si celle-ci est trop importante, l'élément se comporte comme un élément de massif solide ; si elle est trop faible, la résolution est confrontée à des problèmes numériques.

Karabatakis et Hatzigogos (2001) ont montré aussi que la valeur de l'épaisseur de l'interface affecte le champ des contraintes et des déplacements. De ce fait, le rapport de forme est un paramètre important qui influe sur les résultats numériques. (Pande et Sharma 1979 ; Desai et al. 1984 ; Richer 1985 ; Sharma et Desai 1992 ; Hohberg et Schweiger 1992). La stabilité numérique, la précision, la qualité des résultats sont en général assurés lorsque le rapport de forme est compris entre 10 et 100. Dans la pratique, le rapport de forme peut être choisi à partir d'une estimation correcte du déplacement relatif d'interface obtenu dans un essai de cisaillement direct modifié. Le choix du rapport de forme traduit une dépendance des résultats du maillage mais aussi du modèle de comportement utilisé pour l'interface.

De Gennaro et Frank (2005) ont fait varier le rapport de forme entre 1 et 1000 pour un élément d'interface en utilisant le modèle MEPI 2D (De Gennaro et Frank 2002a). L'influence du rapport de forme sur la courbe de cisaillement et sur l'évolution de la contrainte normale lors d'un essai de cisaillement à contrainte normale constante et à volume constant est présentée sur la figure I.16.

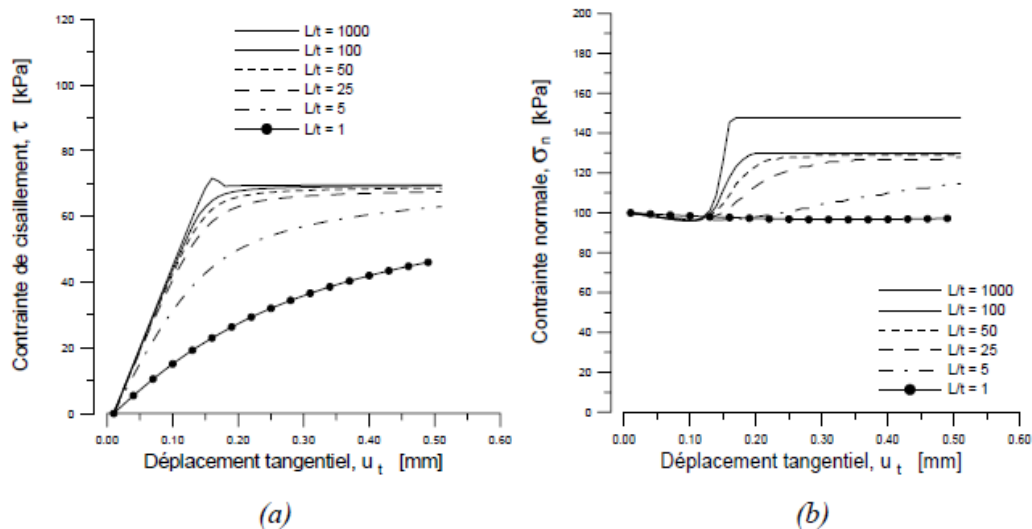


Figure I-16 Etude paramétrique du rapport de forme L/t (a) Courbes de cisaillement à contrainte normale constante (b) Evolution de la contrainte normale au cours du cisaillement à volume constant et interface dilatante (De Gennaro et Frank 2005)

Pour un rapport de forme faible, la courbe de mobilisation de la résistance au cisaillement n'atteint pas la condition ultime ; alors que pour un rapport de forme élevé ($L/t = 1000$), la

courbe de mobilisation présente une faible oscillation à la fin de la phase de mobilisation ; cela est dû à des problèmes numériques associés à l'intégration de la loi élastoplastique d'interface dans le cas d'un élément ayant un rapport de forme trop élevé. De même, lorsque le rapport de forme est trop petit ou trop élevé, l'élément ne traduit pas correctement le comportement dilatant de l'interface. Les résultats présentés sur la figure I.16 suggèrent un rapport de forme entre 25 et 100.

B. Caractéristiques mécaniques élastiques fictives :

Comme indiqué par Hohberg et Schweiger (1992), l'utilisation des éléments type couche mince amène à utiliser des caractéristiques mécaniques fictives de l'interface E^* et ν^* dans le but d'écrire la matrice de rigidité élastique dans le repère global. En effet, la matrice de rigidité élastique de l'interface dans son repère local s'écrit en termes de rigidité élastique normale K_n et tangentielle K_t (eq. I-1). L'identification de la matrice de rigidité élastoplastique locale avec la matrice constitutive élastique permet de définir un module d'Young E^* et un coefficient de Poisson ν^* fictifs pour l'interface qui dépendent de l'orientation de l'élément d'interface dans le repère global (angle α dans la figure I.15). Suivant que la condition de déformation plane ou d'axisymétrie, et pour un élément d'interface horizontal ($\alpha = 0^\circ$) ou vertical ($\alpha = 90$ degrés), les expressions de E^* et ν^* sont donnés dans le tableau suivant.

Condition de déformation plane (Sharma et Desai 1992 ; Hohberg et Schweiger 1992 ; Karabataakis et Hatzigogos 2001)	Condition d'axisymétrie (De Gennaro et Frank 2005).
$D^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$	$D^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$
$E^* = tK_n$ $\nu^* = \frac{K_n}{2K_t} - 1$	$E^* = \frac{K_t(3K_n - 4K_t)t}{(K_n - K_t)}$ $\nu^* = \frac{(K_n - 2K_t)}{2(K_n - K_t)}$

Tableau I.5 détermination des caractéristique mécanique élastique fictive dan le cas de l'élément couche mince en déformation plane et déformation axisymétrique

C. Intégration numérique spécifique :

En suivant les procédures classiques de la méthode des éléments finis dans le cas bidimensionnel, pour l'élément de la figure I.15 dans son repère local, le vecteur de déformation peut être exprimé en fonction des déplacements aux nœuds sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{tt} \\ \varepsilon_{nn} \\ \varepsilon_{tn} \end{pmatrix} = \underline{\underline{B}} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_8 \\ v_8 \end{pmatrix} ; \underline{\underline{B}} = \underline{\underline{L}} \cdot \underline{\underline{N}}$$

ε_{tt} , ε_{nn} et ε_{tn} sont les déformations de l'élément d'interface relatifs au repère local (t,n) (Fig.I.15). La matrice L est l'opérateur de dérivation, la matrice N contient les fonctions de forme N_i aux nœuds de l'élément, u_i et v_i sont les déplacements nodaux de l'élément, respectivement dans les directions x et y. Les fonctions N_i sont définies dans le repère (ξ, η) de l'élément de référence. Pour obtenir la matrice de dérivation B en (eq. I-8), il est nécessaire d'introduire la matrice jacobienne J d'un élément rectangulaire de longueur L et d'épaisseur t qui permet la transformation géométrique entre l'élément réel et l'élément de référence (Potts et Zdravkovic 1999). Comme L s'écrit en fonction du jacobien, les déformations de l'élément deviennent fonction des déplacements nodaux, des fonctions d'interpolation N_i et des dimensions de l'élément (L et t). En réduisant l'épaisseur de l'élément ($t \rightarrow 0$), les termes de la matrice B qui contiennent le rapport (t/L) deviennent négligeables. Pour l'élément de la figure I.15 ($\alpha = 0$ degrés) ; les déformations moyennes s'écrivent alors (voir, pour plus de détails, De Gennaro et Frank 2005):

$$\begin{cases} \varepsilon_{tt} \cong 0 \\ \varepsilon_{nn} = 2 \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{v_i}{t} \cong \frac{[u_n]}{t} \\ \varepsilon_{tn} = 2 \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{u_i}{t} \cong \frac{[u_t]}{t} \end{cases}$$

avec $\varepsilon_n u$ et $\varepsilon_t u$ les déplacements relatifs de l'élément d'interface dans les directions normale (n) et tangentielle (t). La relation (I-9) traduit bien le comportement typique de l'interface.

I.3. Les sollicitations cycliques en géotechnique

I.3.1- Les essais de laboratoire

A/ Les effets des chargements cycliques

L'ensemble des observations expérimentales caractéristiques des chargements cycliques est décrit dans l'ouvrage de Lemaitre et Chaboche (1985).

- ❖ Sous déformation imposée symétrique, les phénomènes de durcissement ou de radoucissement qui se traduisent respectivement par une augmentation et une diminution de la contrainte.
- ❖ Sous déformation imposée non symétrique, le phénomène de relaxation de la contrainte moyenne.
- ❖ Sous contrainte imposée symétrique, le phénomène d'augmentation ou de diminution des déformations.
- ❖ Sous contrainte imposée non symétrique, le phénomène d'accommodation ou de rochet et dans quelques cas le phénomène d'adaptation.

Ces trois grands types de comportement (adaptation, accommodation et rochet) peuvent être décrits de la manière suivante (figure I-17) :

- ❖ A /Adaptation : réversibilité de comportement après un certain nombre de cycles de chargement. La réversibilité parfaite qui correspond au phénomène d'adaptation est un cas un peu théorique difficile à observer dans les sols.
- ❖ B/Accommodation : comportement dissipatif avec stabilisation des déformations.
- ❖ C/Rochet : accumulation des déformations jusqu'à rupture du matériau, c'est-à-dire, la déformation accumulée augmente au cours des cycles de charge et décharge.

La compréhension du fonctionnement des interfaces sous sollicitation cyclique passe, par une description tout d'abord des mécanismes de fonctionnement d'interface puis des observations expérimentales importantes réalisées par différents auteurs, en mettant en évidence les paramètres les plus importants contrôlant les comportements types.

I.3.2-Les essais de cisaillement cycliques

Les essais à la boîte de Casagrande (essai de cisaillement à la boîte) Trois types d'appareils ont été développés et utilisés pour les essais d'interface : type Roscoe (1953), type cylindrique de l'Institut Géotechnique de Norvège (NGI) (Bjerrum et Landva, 1966, Ishihara, 1972, Boulon, 1987) et type rectangulaire conçu par Kishida et Uesugi (1987) (Lings et Dietz, 2004). La figure I-18 montre les deux principaux types d'appareils de cisaillement à la boîte utilisés.

Les essais à la boîte de cisaillement permettant l'étude des interfaces sont de deux sortes :

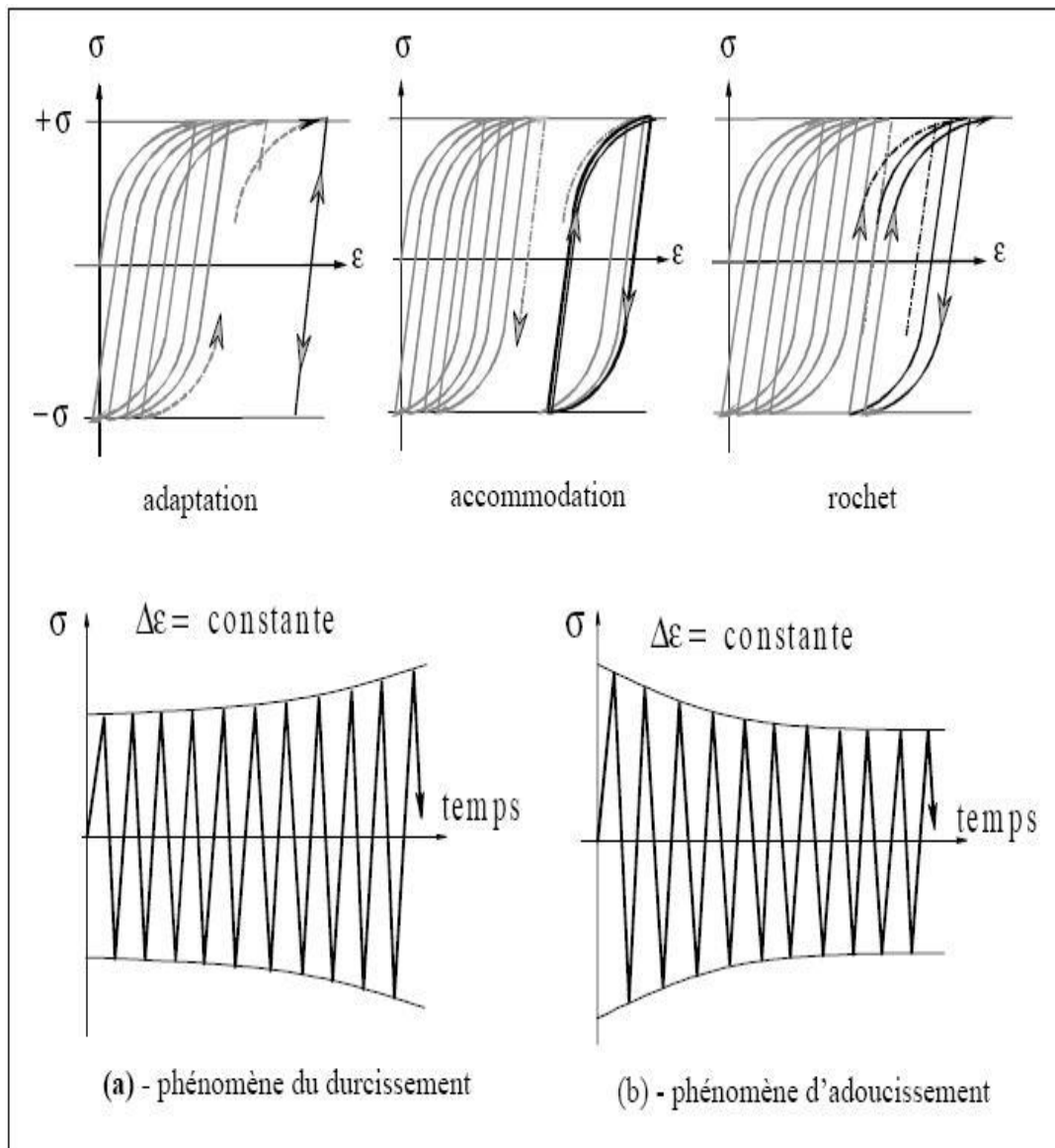
- ❖ Essais à contrainte normale constante.
- ❖ Essais à rigidité normale constante avec le cas particulier de l'essai à déplacement normal nul.

Ces essais peuvent être pilotés en contrainte tangentielle ou déplacement tangentiel suivant le phénomène à étudier : rochet, relaxation, ...etc. Ils sont relativement simples à réaliser au regard d'autres essais comme l'essai triaxial ou l'essai de cisaillement direct car ils reposent sur l'utilisation d'un appareillage assez rudimentaire. Lors de campagnes d'essais, les matériaux peuvent être testés pour plusieurs indices des vides.

Les figures I-19 à I-20 issues des travaux de Shahrour et Rezaie (1997) présentent ces différents types d'essais pour des sables de densité relative différente. Les principales informations sur le comportement du sol testé sont les suivantes :

- ❖ Essais à contrainte normale constante : pour la contrainte de cisaillement, lors d'un essai monotone, dans le cas d'un sable dense, celle-ci augmente puis diminue ce qui traduit un phénomène de radoucissement. Dans le cas d'un sable lâche, la contrainte de cisaillement augmente continûment traduisant un resserrement des grains de sables les uns par rapport aux autres ce qui traduit un phénomène de durcissement. Pour le déplacement normal, on note en général une phase de contractance suivi d'une phase de dilatance. La phase de dilatance caractérise les sables denses pour lesquels le cisaillement se traduit par une augmentation de l'indice des vides. Lors d'un essai cyclique, ces phénomènes de radoucissement (figure I-19) et de durcissement (figure I- 20) ou de contractance et de dilatance sont aussi observés. Ils traduisent l'évolution du matériau au cours des cycles alors que le chargement moyen appliqué reste identique.

- ❖ Essais à déformation normale nulle : au cours d'un cycle ou lors de la première phase de chargement monotone, la contrainte de cisaillement augmente continûment (figures II-5 et I-22). On note lors des cycles suivants un phénomène de radoucissement qui ne dépend pas de l'état lâche ou dense du matériau cisailé. Lors d'un cycle, la contrainte normale diminue puis augmente ce qui traduit le passage du domaine contractant au domaine dilatant. Au cours des cycles, la contrainte normale observée au cours d'un cycle diminue indépendamment de la densité initiale du sol.



**Figure I-17 : Observations lors de la réalisation d'essais cycliques
(Lemaitre et Chaboche, 1985)**

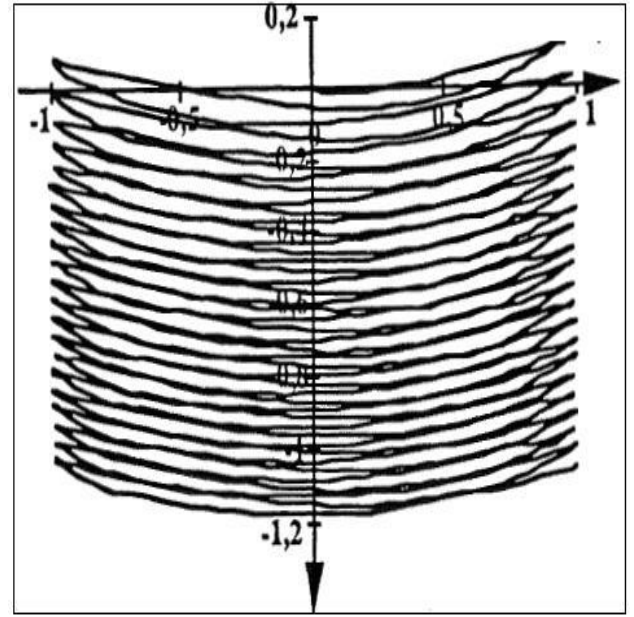
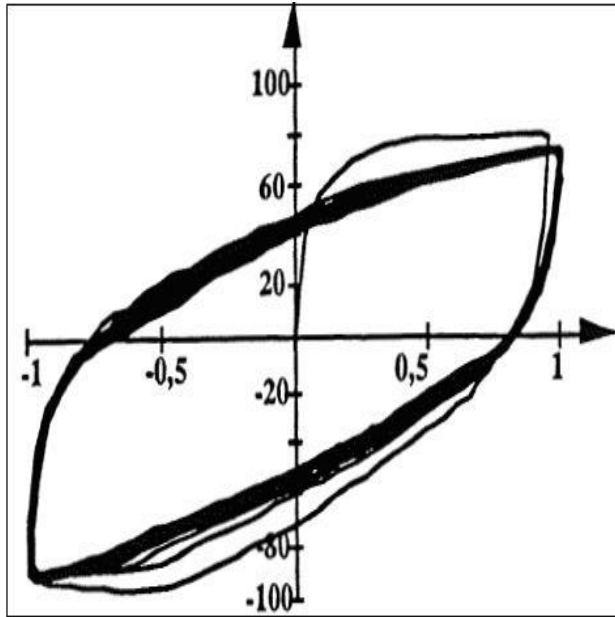


Figure I-18 : Evolution de la contrainte de cisaillement et du déplacement normal u_n pour un essai cyclique à déplacement relatif tangentiel imposé sous une contrainte normale constante (sable lâche, densité relative : 15%) (Shahrour et Rezaie, 1997)

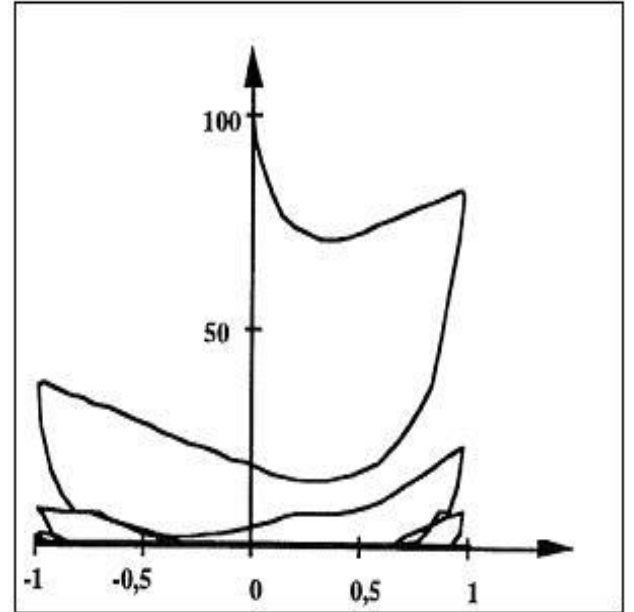
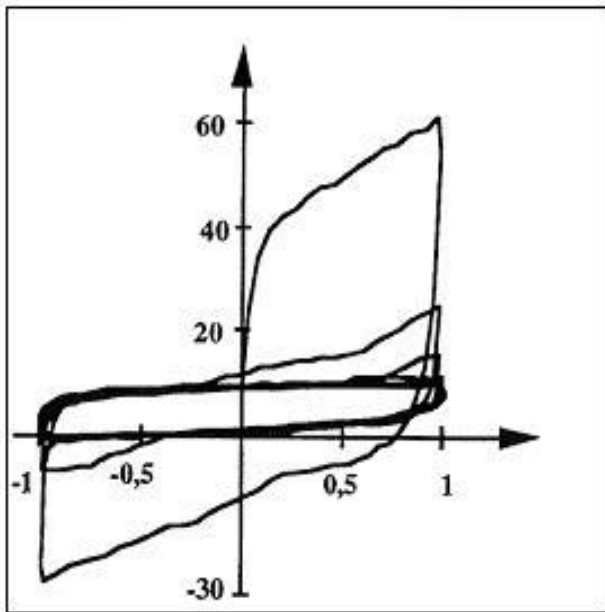


Figure I-19 : Evolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale σ_n pour un essai à déplacement relatif tangentiel imposé avec un déplacement normal nul (sable dense, densité relative : 90 %) (Shahrour et Rezaie, 1997)

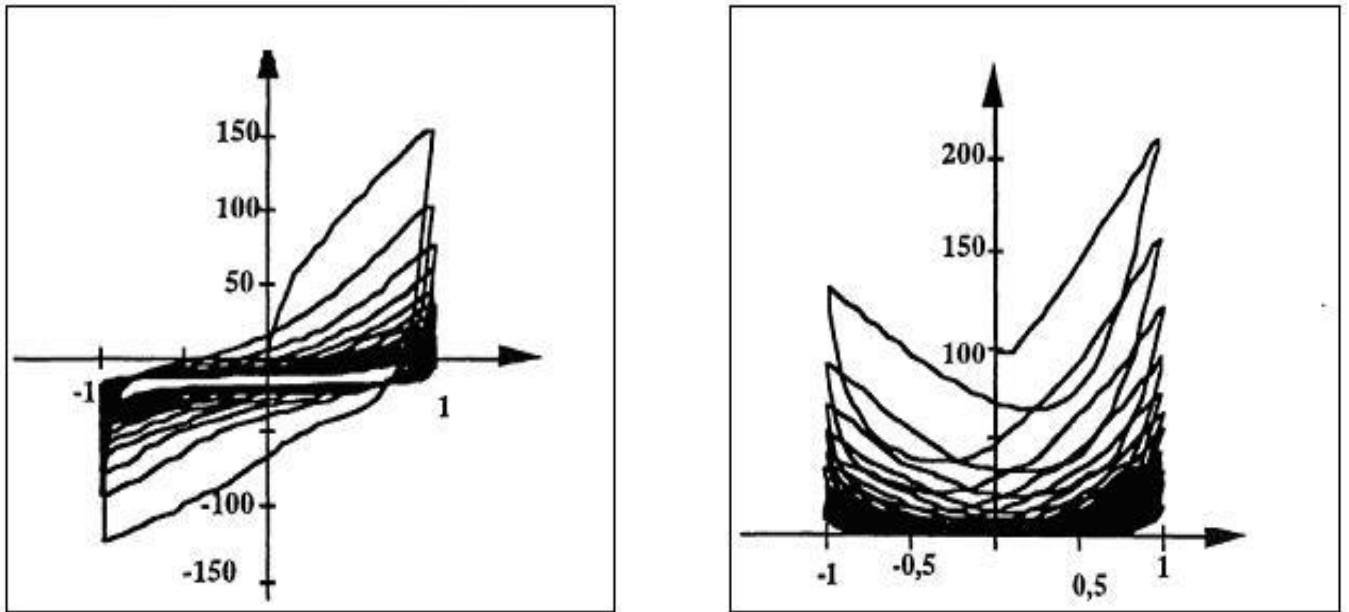


Figure I-20 : Evolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale σ_n pour un essai à déplacement relatif tangentiel imposé avec un déplacement normal nul (sable lâche, densité relative : 15 %) (Shahrour et Rezaie, 1997)

A/ Les essais à l'appareil triaxial

L'essai triaxial est un essai de compression axiale d'un échantillon soumis à une contrainte latérale constante. Il consiste à soumettre une éprouvette généralement cylindrique à un champ de contrainte uniforme qui a pour composantes une pression hydraulique appliquée par l'intermédiaire d'un fluide remplissant la cellule et une contrainte axiale ou déviateur appliquée par l'intermédiaire d'un piston (figure 1-7). On maintient à niveau constant la pression de confinement hydraulique et on augmente progressivement la contrainte axiale ou le déviateur, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Dans certains cas, la contrainte axiale est réduite et on peut assister à des ruptures en extension de l'échantillon. La détermination du critère de rupture nécessite de réaliser plusieurs essais triaxiaux à différentes pressions de confinement hydraulique. La figure 1-8 présente un résultat d'un essai drainé (pression de confinement hydraulique est 100 kPa, densité relative est 70%) (El Dine et al, 2010). Ce résultat permet de mettre en évidence la contrainte de rupture (au pic) et la contrainte résiduelle (au palier). Les mesures des déformations axiales et transversales durant l'essai permettent d'obtenir la valeur du module d'Yong et du coefficient de Poisson sous différentes contraintes de confinement.

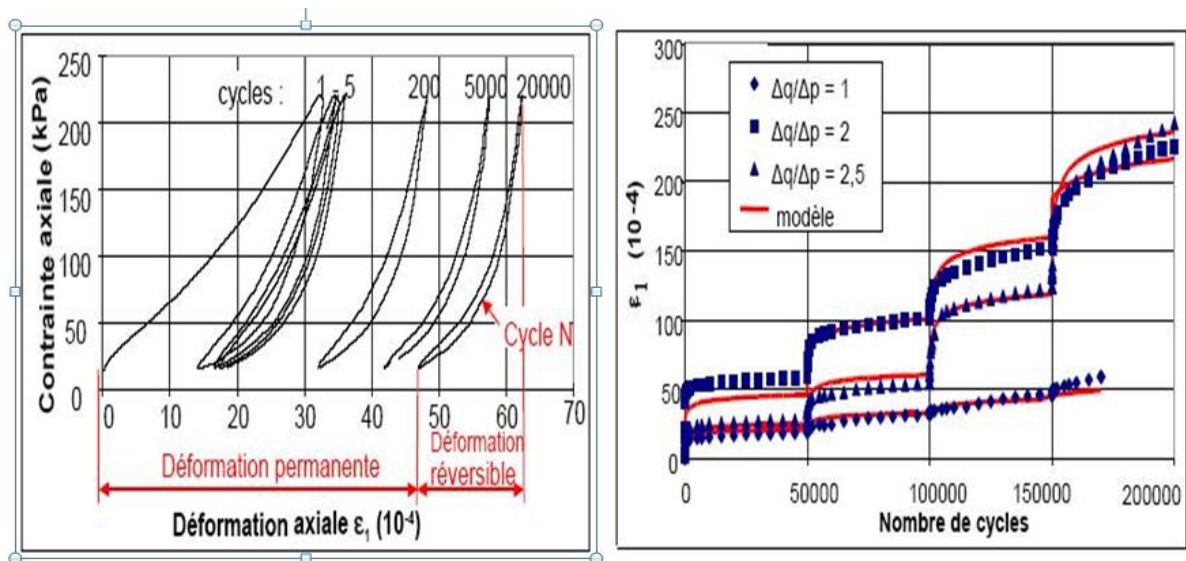
Les expériences et les pratiques d'ingénierie montrent que la résistance du sol est influencée par le niveau de consolidation de ce dernier (l'éprouvette est soumise à un champ de contraintes isotropes jusqu'à une valeur donnée pendant 24 heures), le drainage et la force appliquée. L'essai triaxial comprend trois grands types d'essais qui couvrent ces différentes configurations :

- ❖ Essai consolidé-drainé ou drainé (CD)
- ❖ Essai consolidé-non drainé (CU) avec éventuellement la mesure de la pression interstitielle (CU+u)
- ❖ Essai non-consolidé-non drainé (UU)

Dans l'essai non drainé, la pression dans la cellule est maintenue constante, la pression axiale étant augmentée mais sans permettre le drainage de l'éprouvette. Par conséquent, la pression interstitielle évolue au cours de l'essai. Pour l'essai drainé, l'échantillon est toujours drainé, le robinet du réservoir est ouvert pendant l'essai, la pression interstitielle disparaît. Les contraintes mesurées sont effectives. La figure 1-21 présente quelques résultats d'essai triaxial cyclique (Hornych, 2006). Différents chemins de contraintes peuvent être réalisés : chemin triaxial, chemin purement déviatorique, chemin avec rotation des axes de contrainte principaux (variation de l'angle de Lode), ...etc.

Lors d'essais triaxiaux cycliques, des phénomènes similaires à ceux observés lors d'un essai de cisaillement direct peuvent être observés : adaptation, accommodation ou fluage d'un part et contractance ou dilatance d'autre part. Il est complexe toutefois d'identifier clairement ces comportements car au cours d'un cycle la contrainte moyenne varie.

L'essai triaxial, lors d'essais en condition non drainée, permet de mettre en évidence des phénomènes de liquéfaction ou de mobilité cyclique (figures 1-22). Ces phénomènes se raduisent par une annulation progressive de la contrainte moyenne effective et l'apparition de déformations très importantes. Ce phénomène est dû sous les sollicitations cycliques à la contractance du matériau qui provoque une augmentation des pressions interstitielles induisant à son tour une diminution de la contrainte moyenne effective jusqu'à la rupture de l'élément de sol. Dans le cadre de ce travail, ce phénomène n'est pas abordé car les sollicitations cycliques considérées sont trop lentes pour pouvoir considérer que les pressions interstitielles ne peuvent pas se dissiper. Ce phénomène pourrait éventuellement être observé dans des argiles très imperméables dotées de contractance.

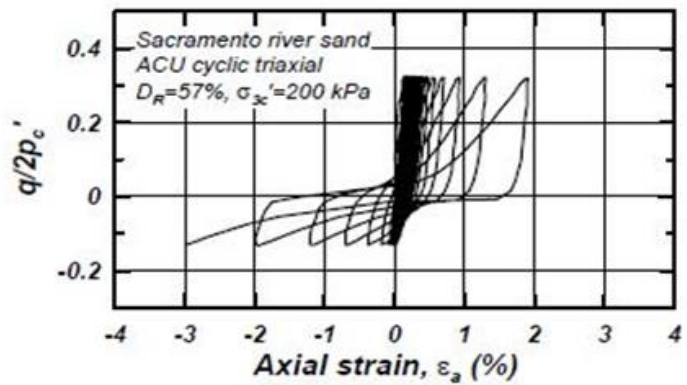


(a) : Evolution de la déformation radiale et du nombre de cycles

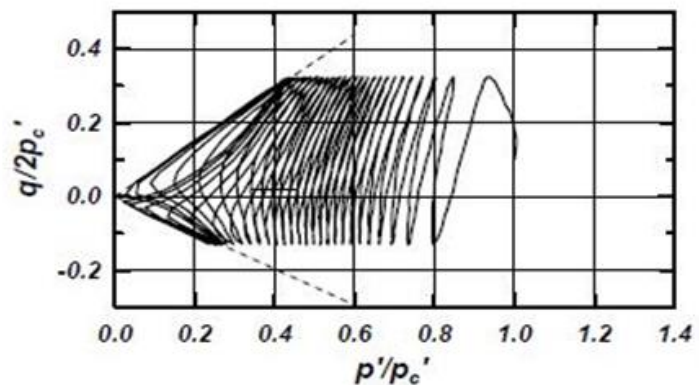
(b) : Déformation radiale en fonction de la contrainte axiale au cours des cycles

Figure I-21 : Résultat d'un essai triaxial cyclique (Hornych, 2006)

Liquéfaction $\leftrightarrow$ Déformations très importantes



Liquéfaction $\leftrightarrow$ annulation de la contrainte moyenne effective



**Figure I-22 : Résultats typiques d'un essai triaxial cyclique non drainé
(Boulanger et Idriss, 2004)**

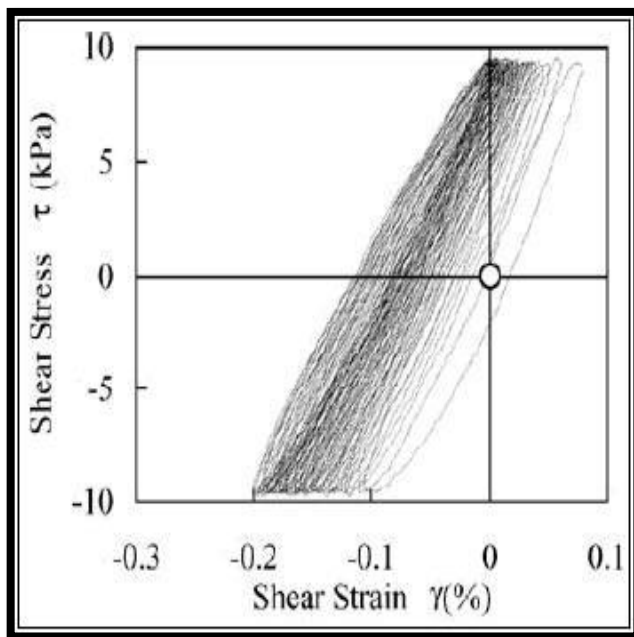
B/ Les essais à la boîte de cisaillement simple

L'essai de cisaillement simple (direct-simple shear) est essentiellement utilisé pour l'étude des sols sous sollicitations cycliques et dynamiques ainsi que pour des développements pointus dans le domaine de la rhéologie (comportement des enrobés par exemple). L'intérêt de cet essai réside dans le fait que l'élément de sol testé sous contrainte moyenne constante subit une distorsion pure qui induit une rotation des contraintes principales.

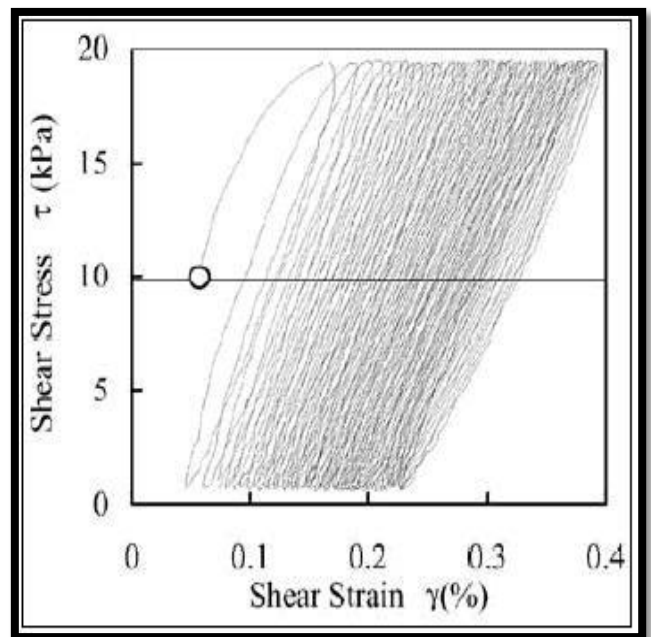
L'élément de sol est confiné entre des anneaux qui permettent à la fois de conserver une section transversale constante pour l'échantillon et d'imposer la distorsion de cisaillement. Un effort normal est appliqué sur la partie supérieure de l'échantillon. Un contrôle de la pression interstitielle développée au cours de l'essai est possible (essai drainé ou non drainé). Des exemples d'appareillages utilisés sont présentés sur les figures I-23 et I-24

Les résultats obtenus (Song et al, 2004) sont similaires à ceux issus d'essais à la boîte ou d'essais triaxiaux à la différence près qu'il y a une rotation des contraintes principales au cours de l'essai. Des phénomènes d'adaptation, d'accommodation ou de rochet peuvent être observés (figure I-23).

Cet appareillage a aussi permis d'établir des résultats concernant l'évolution de la cohésion non drainée d'un sol au cours de cycles de charge et de décharge. De nombreux essais sur l'Argile de Drammen (figure 1-24) ont notamment été réalisés par Andersen et Lauritzen (1988). Ils permettent d'examiner la variation de la résistance de cette argile en fonction de la contrainte moyenne (σ) et de la contrainte cyclique (σ_{cy}). Tant que la contrainte moyenne reste inférieure à une valeur comprise entre 20 et 30 % de la valeur de cohésion non drainée mesurée lors d'un essai monotone, l'effet des cycles se fait peu ressentir. Il est important de noter que ces expérimentations font partie d'une démarche globale permettant d'analyser la capacité portante de fondations sous chargements cycliques. L'analyse comprend notamment la détermination de la charge de rupture en fonction des cycles, le lieu de la surface de rupture et le mode de rupture par déplacements cycliques trop importants et/ou par excès de déplacements cumulés.



(a) : Rochet puis accommodation



(b) : Rochet

**Figure I-23 : Essai de cisaillement simple cyclique
(sable dense, densité relative : 70 %) (Song et al, 2004)**

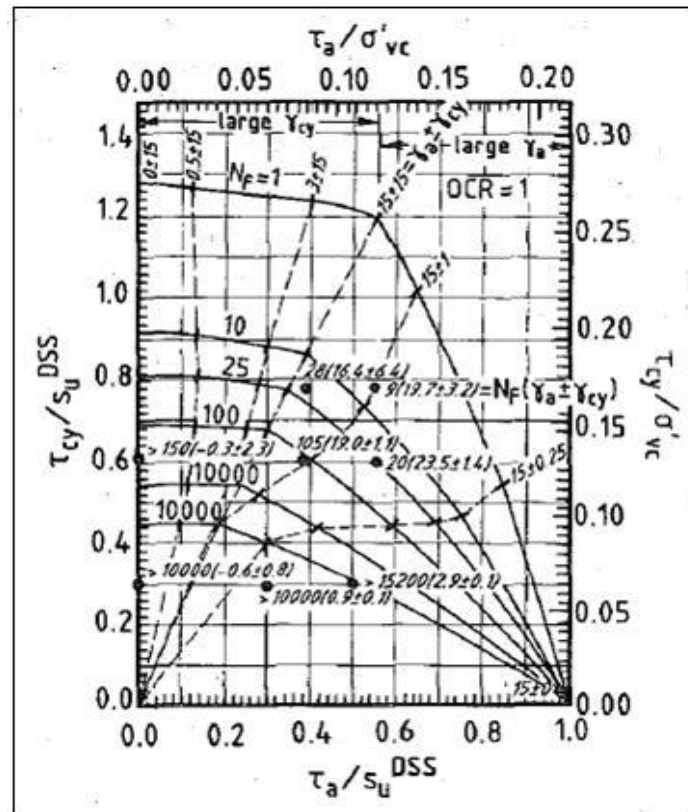


Figure I-24 : Essais de cisaillement direct – Nombre de cycles N_F induisant la rupture de l'échantillon (Argile de Drammen normalement consolidée) (Andersen et Lauritzen, 1988)

I.4.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 pressiométrique 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 1 000 kPa),
- ❖ permettre de grands déplacements tangentiels d'interface sans perte de matériau,
- ❖ pouvoir réaliser des sollicitations monotones à vitesse contrôlée variable et des sollicitations cycliques,
- ❖ 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'interface.

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI

Chapitre II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI

II.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 (en acier) afin de mesurer les caractéristiques de l'interface Figure [2-1].

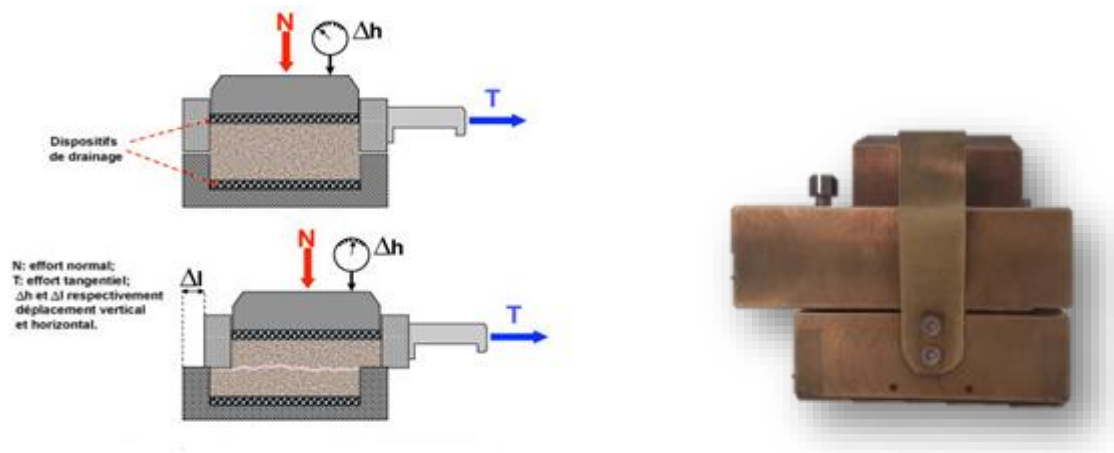


Figure.II.1: Principe de la boîte de cisaillement direct

Les moyens disponibles au laboratoire n'ont pas permis de réaliser des essais à déformation constante et de quantifier la rugosité de la surface, dans la suite on distingue uniquement deux surfaces: une surface lisse constituée d'une plaque d'acier lisse et une interface rugueuse obtenue par collage des grains de sable sur la plaque d'acier avec un chemin à contrainte normale constante. Si les grains de sable collés sur la surface solide sont les mêmes que ceux du matériau utilisé, la surface rugueuse est définie comme " **Standard** ".

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI



Figure. II.2.a: surface rugueuse en acier



Figure. II.2.b : surface lisse en acier

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 boîte utilisée a une section carrée (6 cm de côté) et une profondeur de 2.5 cm. 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 [2-3]

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI



Figure.II.3 : Appareil de cisaillement direct

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 (u) et du déplacement relatif tangentiel (w)

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI

II.3. MATERIAUX ETUDIES :

Les essais ont été réalisés avec le sable des dunes (vile de Boussaâda w de m'silla)



Figure.II.4 : vus de sable.

❖ Caractéristiques physiques :

Les résultats d'essais en laboratoire, suivant les normes Française (AFNOR) données les caractéristiques suivantes:

- Poids volumique (γ_{dmin}) sec à l'état lâche : 13.40 KN/m³
- Poids volumique (γ_{dmax}) sec à l'état dense : 16.60 KN/m³
- Equivalent de sable E.S=84.11 % (sable propre : absence des fines argileuses)
- Equivalent de sable E.S.V=71.21 % (sable propre : absence des fines argileuses)

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI



Figure. II.5: essai la masse volumique.



Figure. II.6: essai l'équivalent de sable.

❖ Analyse granulométrique :

D'après l'analyse granulométrique qui est déterminé par tamisage, c'est un sable fin (de 50% des grains de sable ont un diamètre compris entre $(0.07\text{mm} / 0.2\text{mm})$). Les résultats du tamisage à sec (AFNOR ,1996) sont résumés dans le tableau 2-1.

On distingue : le coefficient d'uniformité Hazen et le coefficient de courbure

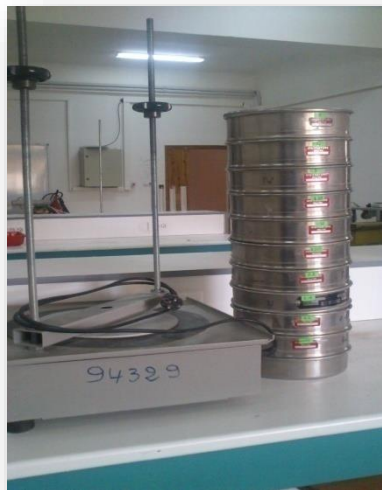


Figure.II.7: essai de l'analyse granulométrique.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI

MASSE DE L'ESSAI=1000g				
TAMIS (mm)	REFUS (g)	REFUS CUMULES (g)	REFUS CUMULES (%)	TAMISATS CUMULES (%)
0.4	5.9	5.9	0.05	99.41
0.315	22.4	28.3	0.28	97.17
0.2	663.8	692.1	69.21	30.79
0.160	174.2	866.3	86.63	13.37
0.125	117.9	984.2	98.42	1.58
0.1	6.1	990.3	99.03	0.97
0.08	5.7	996	99.6	0.4
FOND	3.7	999.7	99.97	0.03

Tableau II-1 :analyse granulométrie de sable de dune

Donc ne constate que 97.83% de grain de sable de dune et de diamètres enter 0.125 mm ET 0.315 mm.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}} = 1.00$$

$$C_u = \frac{d_{10}}{d_{60}} = 0.625$$

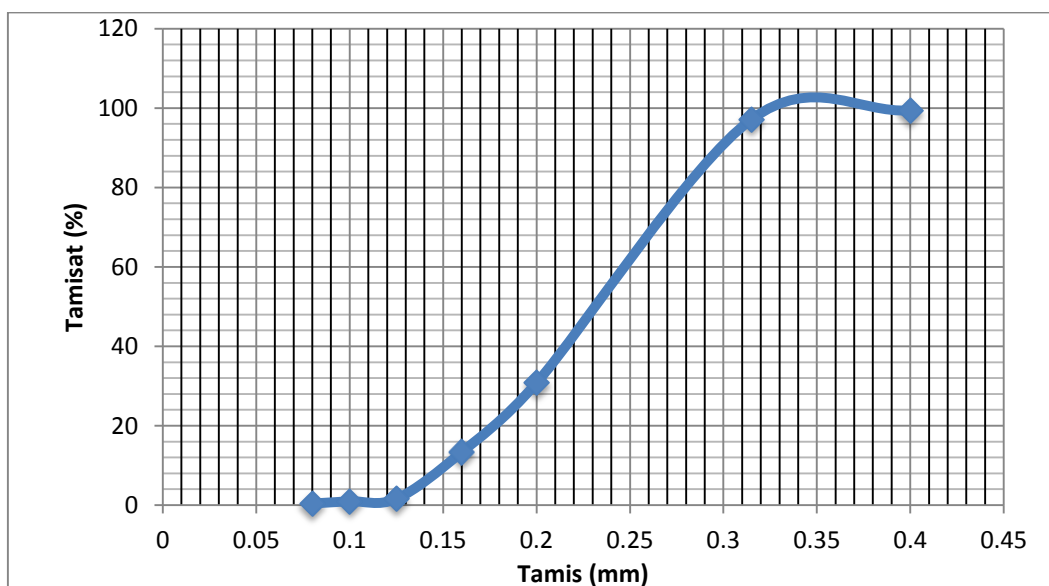


Figure.II.8 : Courbe granulométrique du sable testé

DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE ET MODE OPERATOIRE SUIVI

II.4. 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 (v .Boussaâda)), rugosité de la surface de la structure (lisse ou rugueuse), densité du sable (lâche ou dense), nombre de cycle.

CHAPITRE III

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

Chapitre III:

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

Cette partie est consacré à la présentation des résultats d'une série d'essai de simulation du comportement des interfaces (sol-structure), ces essais ont permis l'étude de l'effet des principaux paramètres sur le comportement de l'interface ; type du sable (fin sable de dune (de Boussaâda), rugosité de la surface de la structure (lisse ou rugueuse), densité du sable (lâche ou dense), contrainte de confinement est constant, nombre de cycle, et enfin, la condition imposée dans la direction verticale (contrainte imposé).

III.1. ESSAIS REALISES SUR SABLE :

Une série d'essais de cisaillement direct cyclique a été réalisée pour étudier l'influence de principaux paramètres (la rugosité, la densité initiale) sur le comportement de l'interface sol-structure. Les essais ont été effectués avec deux densités (lâche et dense) et deux types de 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 et avec des essais d'interface sable-sable. Les essais ont été réalisés avec un chemin de chargement: à contrainte normale constante. Une gamme de contraintes de 100 Kpa a été explorée.

III.2. Surface sable-sable :

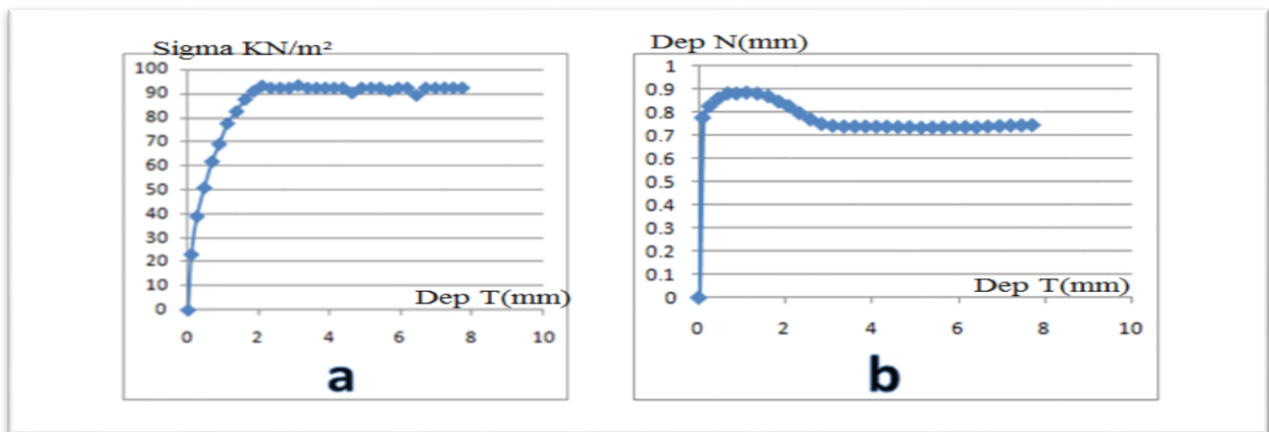
Sable lâche

Des essais ont été effectués à contrainte normale initiale ($\sigma_{no} = 100 \text{ kPa}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (III.1a et III.1b).

On constate que la contrainte de cisaillement croît au début de chargement jusqu'à un déplacement Tangentiel de l'ordre de 2.33 mm). Ensuite, elle continue constant,

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 0.674 mm puis on remarque de stabilisation de ce déplacement, jusqu'à la fin de chargement.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



NORMAL STRESS= 100 KN/m²

SHEAR STRESS=93, 22 KN/m²

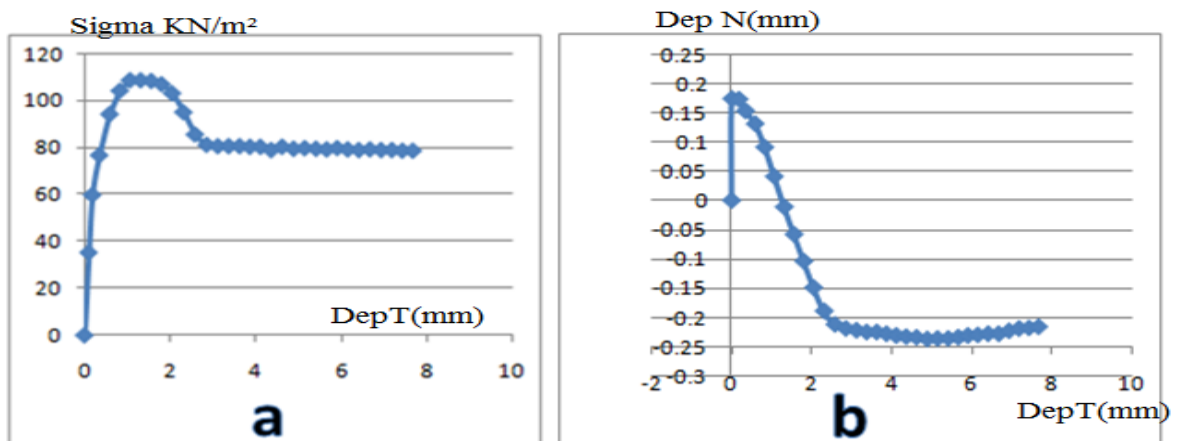
Figure : III.1.Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface sable-sable, sable des dunes (Id=15%)

a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal

Sable dense :

Des essais ont été effectués à contrainte normale initiale ($\sigma_{no} = 100\text{kPa}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (III.2a et III.2b).



NORMAL STRESS= 100KN/m²

SHEAR STRESS=108,61KN/m²

Figure : III.2. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface sable-sable, sable des dunes (Id=90%)

a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

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 1.56 mm, après lequel, elle diminue pour se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 4.897mm.

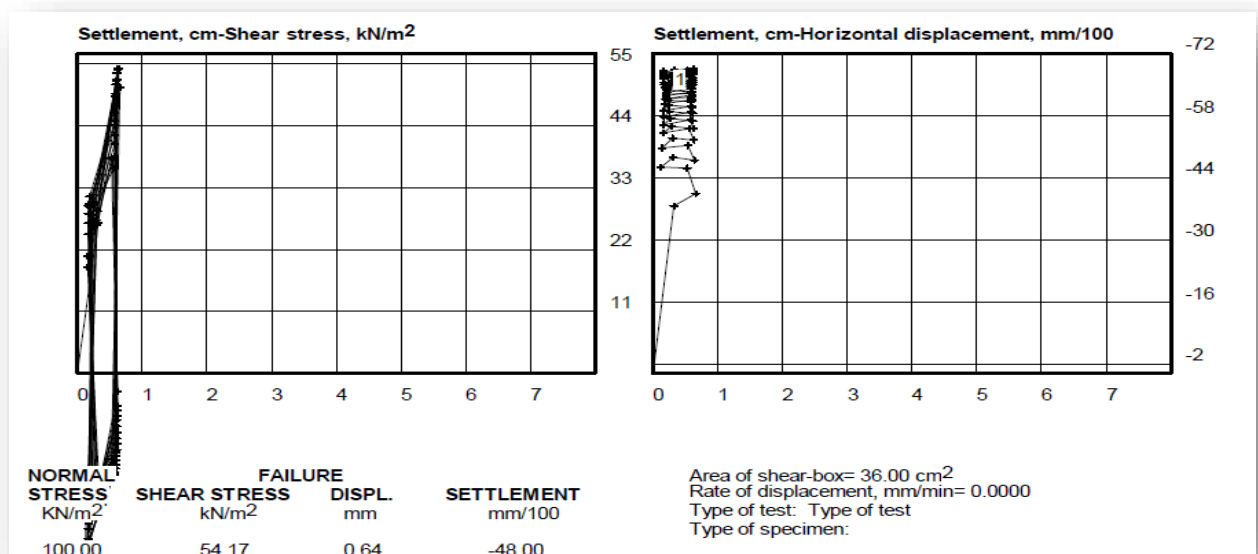
L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la Figure III.2b. On constate que le comportement au début de l'essai est contractant, ensuite, il devient dilatant (pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 1,317 mm).

III. 3.ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE DE DUNE :

Le comportement cyclique de l'interface a été étudié sur des chemins à contrainte normale constante et ceci pour deux densités (sables dense et lâche) et deux types de surfaces (rugueuse et lisse). Tous les essais ont été réalisés à une contrainte normale initiale de 100 kPa. Ci-après, nous allons présenter les résultats des essais réalisés.

III.3.1. Surface sable sable :

✓ Sable dense:



a

b

Figure : III.3.Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface sable-sable, sable des dunes (Id=90%),20cycle

a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

L'essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-0.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0.5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.3a à III.3b. On remarque que le chargement cyclique induit un écoulement négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $12,5 \text{ kN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 24,59% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de $0,638 \text{ mm}$.

✓ Sable lâche :

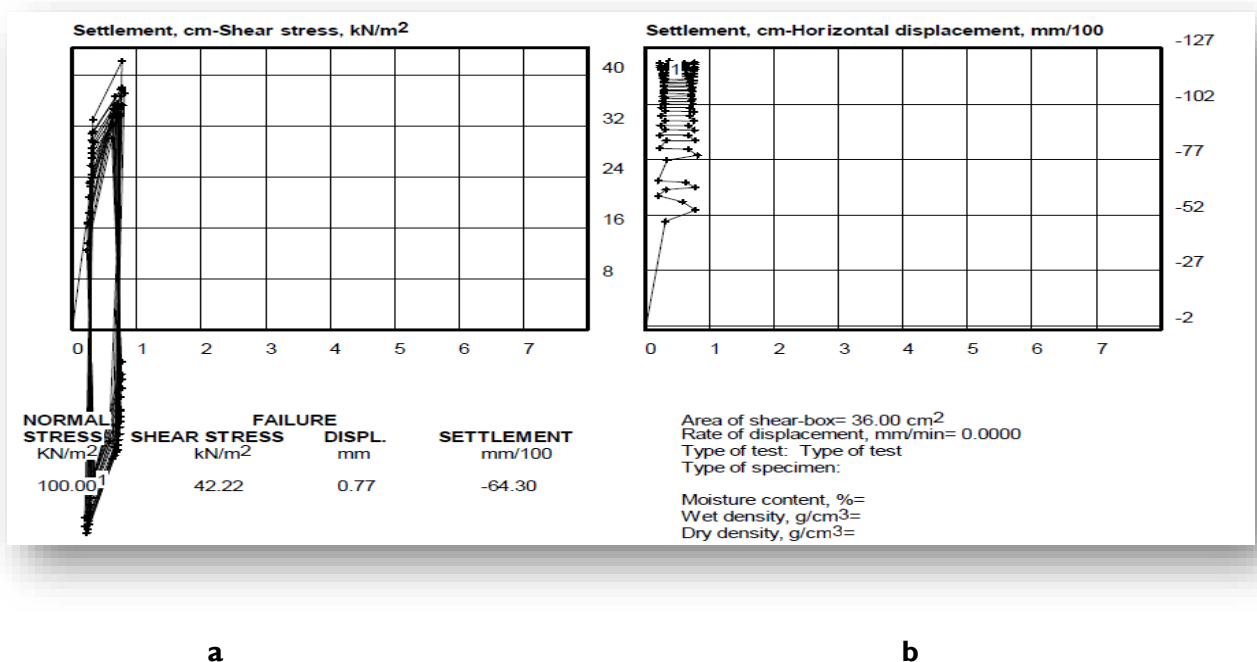


Figure : III.4.Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface sable-sable, sable des dunes ($I_d=15\%$), 20 cycle

a: Évolution de la contrainte tangentielle b: Évolution du déplacement normal

L'essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-0.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0.5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.4a à III.4b. On remarque que le chargement cyclique induit un écoulement négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $5,27 \text{ kN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 14,17% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,214mm.

III.3.2. Surface sable _structure :

III.3.2.1 Surface rugueuse (Acier)

✓ Sable dense

Essais cycliques en déplacement tangentiel contrôlé ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$). Trois essais de cisaillement cyclique ont été effectués dans le but d'étudier l'effet de la forme et de l'amplitude des cycles sur le comportement cyclique de l'interface.

Le premier essai a été réalisé avec un chargement alterné dans le domaine post-pic ($-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.5a à III.5e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de 5,84 KN/m² au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 8,61% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1.794 mm.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

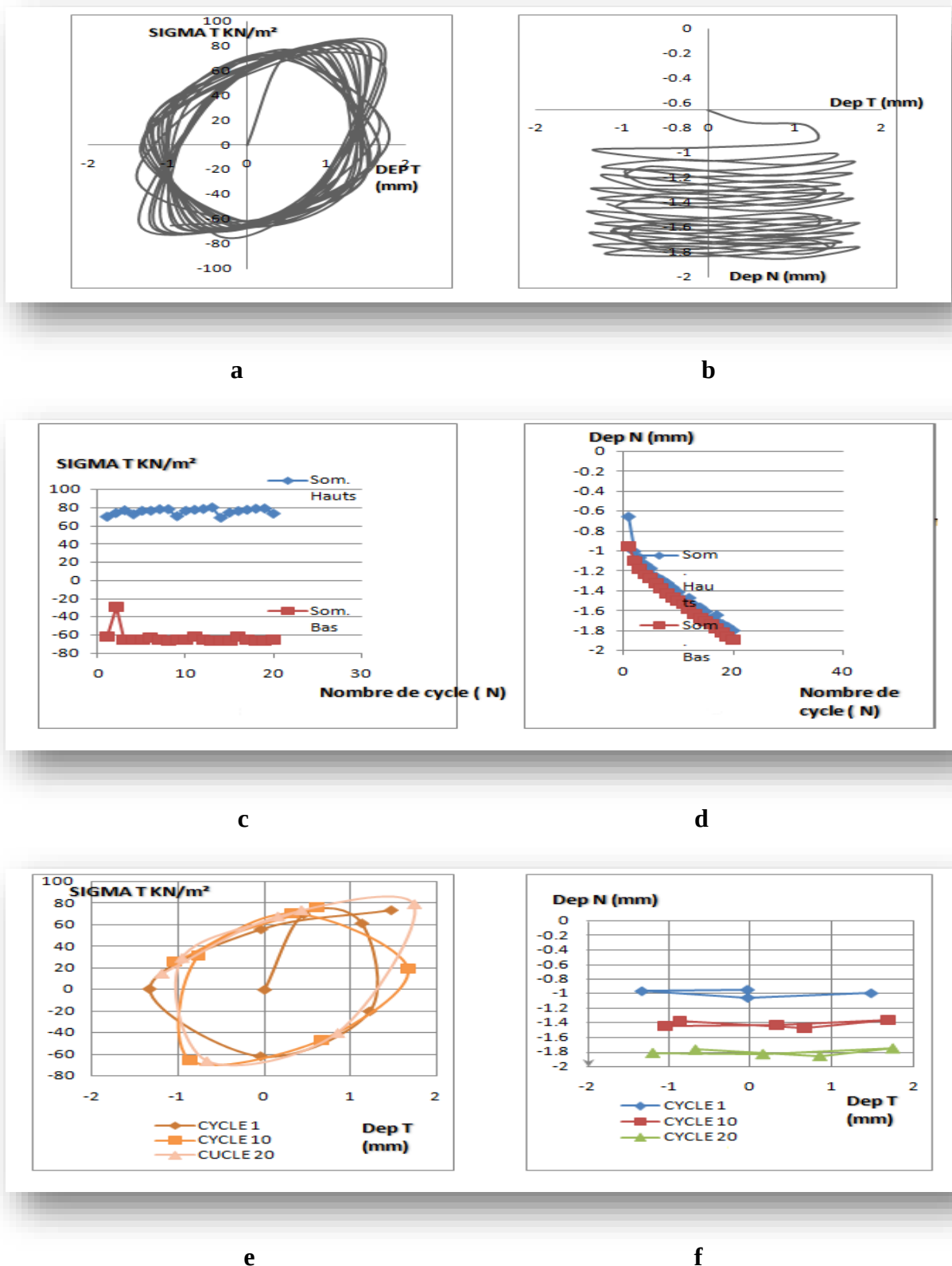


Figure : III. 5. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 2

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

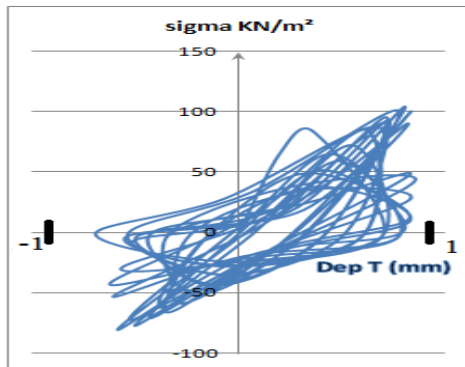
Le deuxième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.6a à III.6e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de $16,67 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 19,80% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,777 mm.

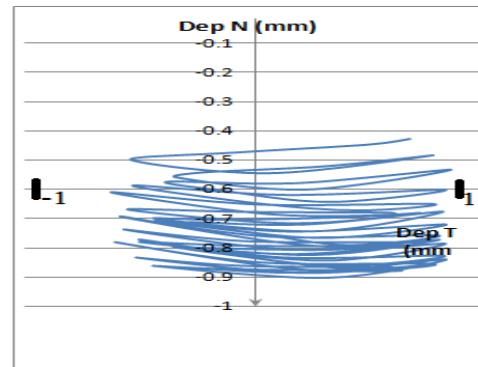
Le troisième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude plus faible ($-0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.7a à III.7e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $11,67 \text{ KN/m}^2$ au bout de 40 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 16,73% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,813 mm.

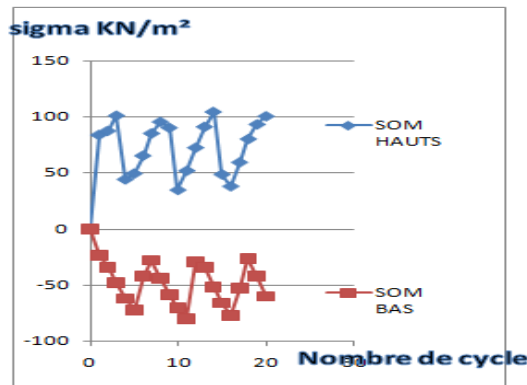
PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



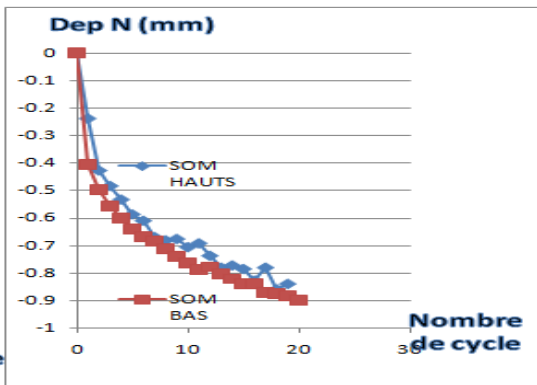
a



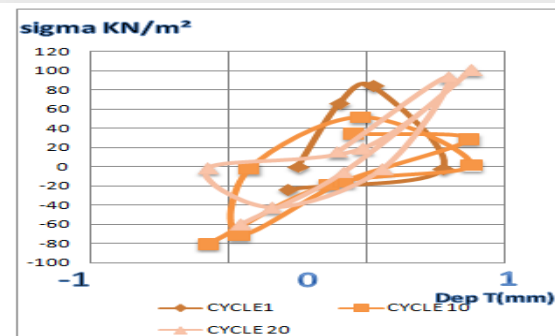
b



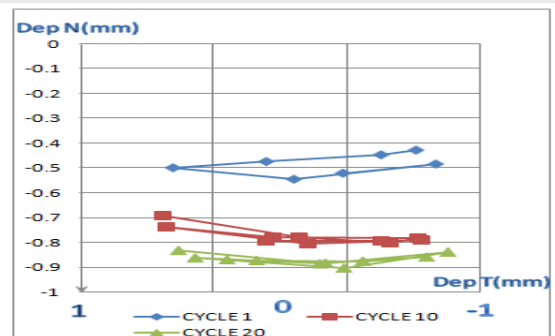
c



d



e

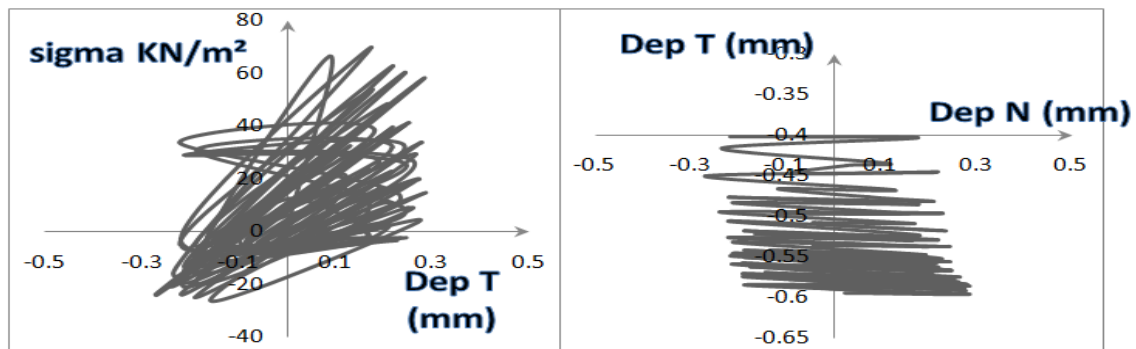


f

Figure : III. 6. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

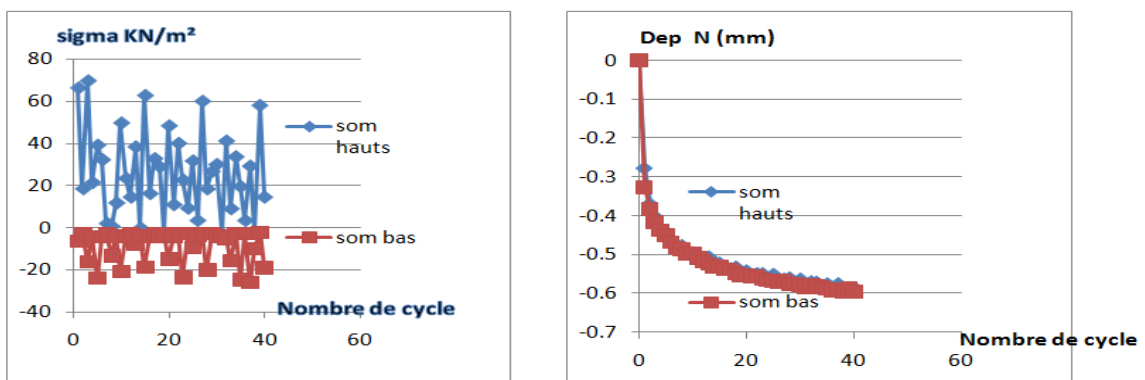
a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 20

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



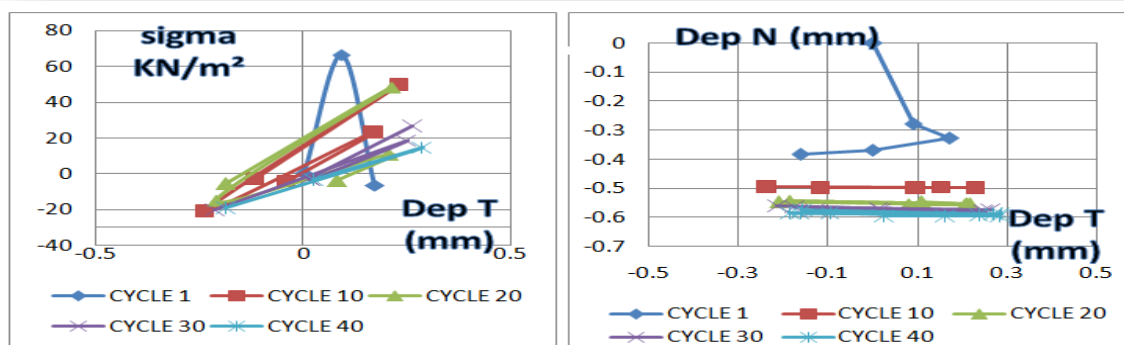
a

b



c

d



e

f

Figure : III. 7. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal

e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10 ,20,30et 40. f: déplacement normal au cycle 1,10,20,30et 40

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

✓ Sable lâche

Essais cycliques en déplacement tangentiel contrôlé ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$). Trois essais de cisaillement cyclique ont été effectués dans le but d'étudier l'effet de la forme et de l'amplitude des cycles sur le comportement cyclique de l'interface.

Le premier essai a été réalisé avec un chargement alterné dans le domaine post-pic ($-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.8a à III.8e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif de premier cycle jusqu'au sixième cycle. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de 11,72 KN/m² au bout de 6 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 13,18% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle. Après le sixième cycle, le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de 18,33 KN/m² au bout de 20 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 20,62% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,632 mm.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

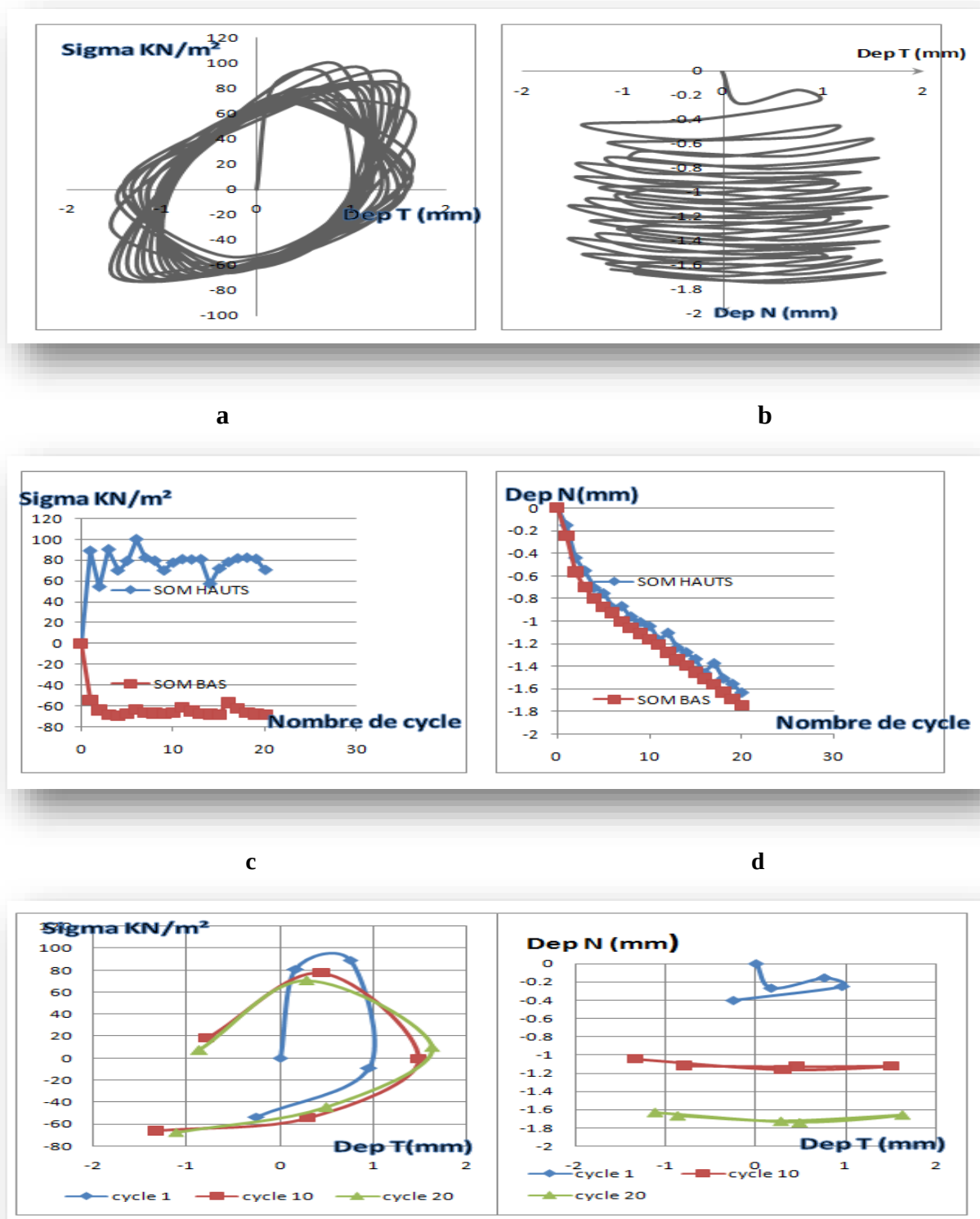


Figure : III.8. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 20

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

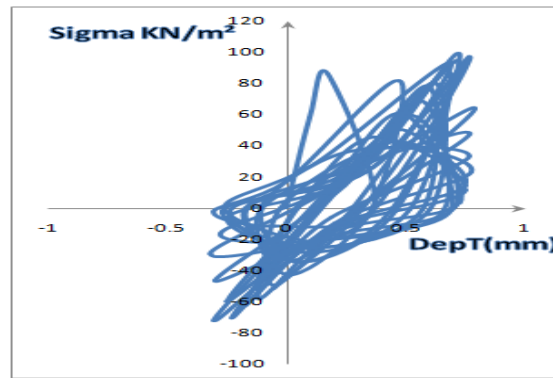
Le deuxième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.9a à III.9e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de $13,33 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 15,53% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,262 mm.

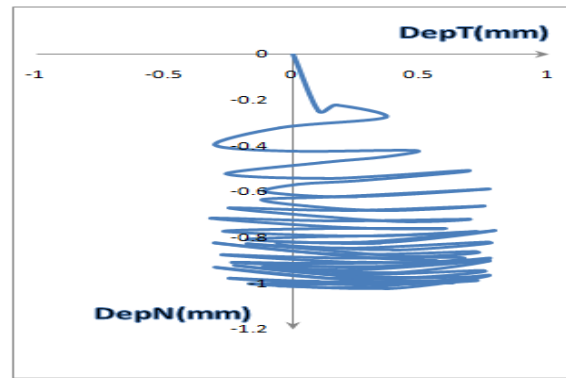
Le troisième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude plus faible ($-0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.10a à III.10e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augment de $9,17 \text{ KN/m}^2$ au bout de 60 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 13,53% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,929 mm.

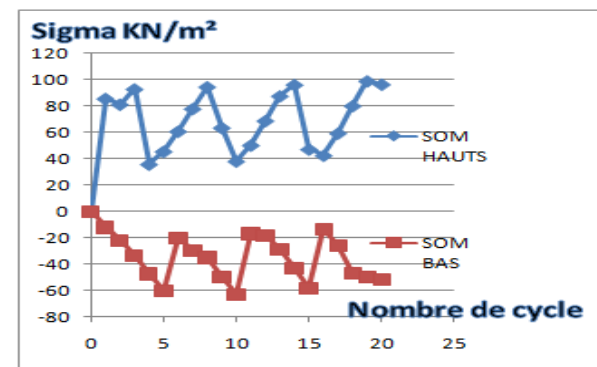
PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



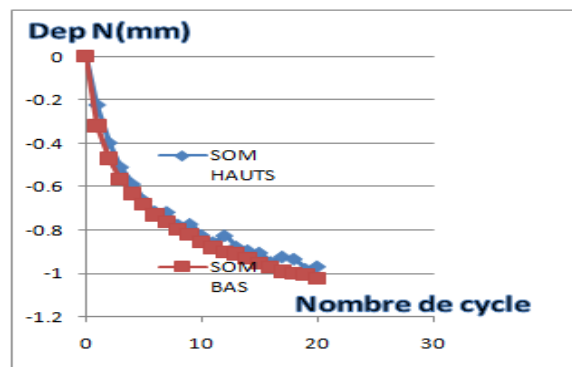
a



b



c



d

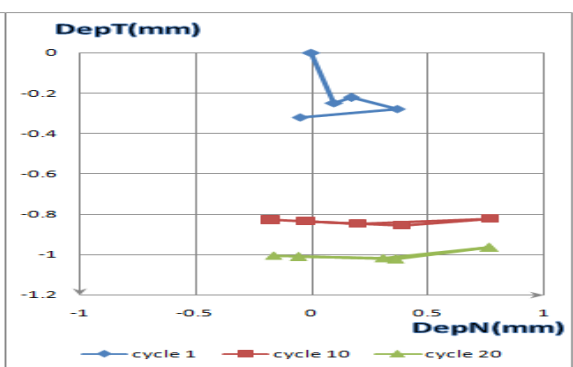
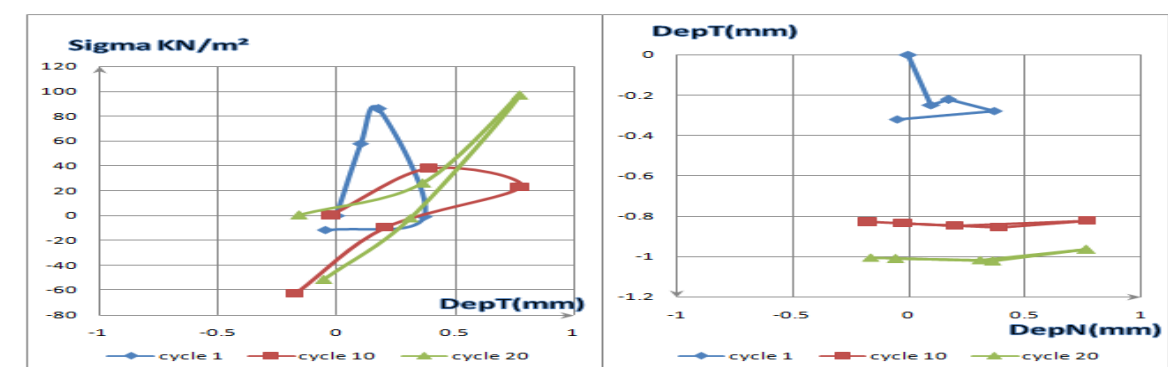
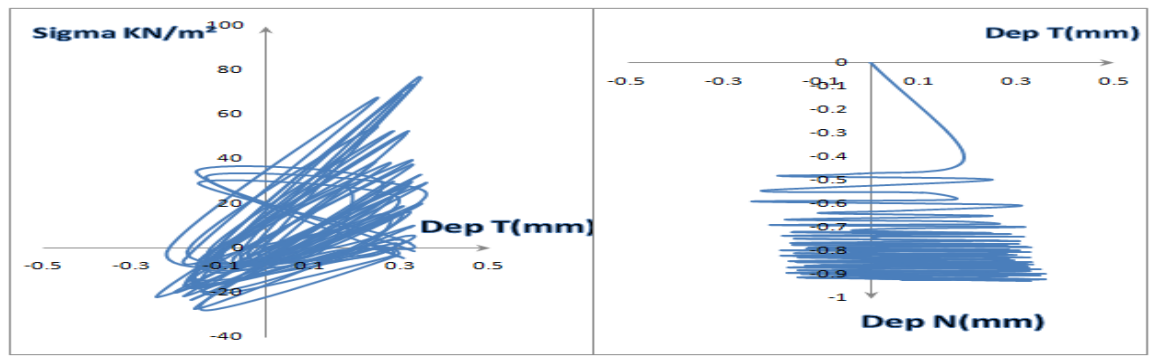


Figure : III.9. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

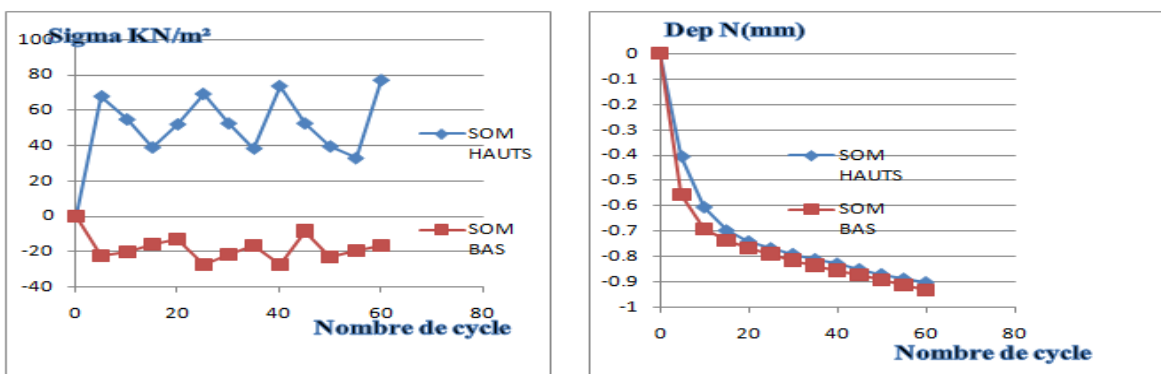
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 20

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



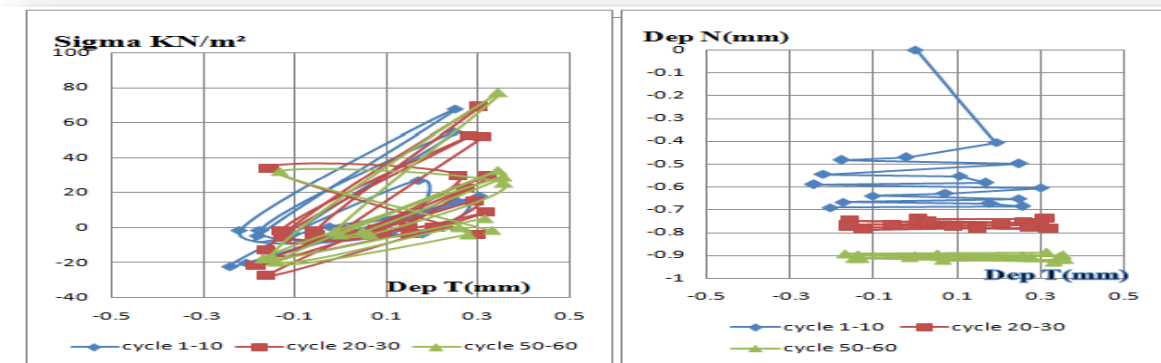
a

b



c

d



e

f

Figure : III.10. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$
Surface rugueuse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal

e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10,20,30,50,60. f: déplacement normal au cycle 1,10,20,30,50,60.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

III.3.2.2 Surface lisse (Acier)

✓ Sable dense:

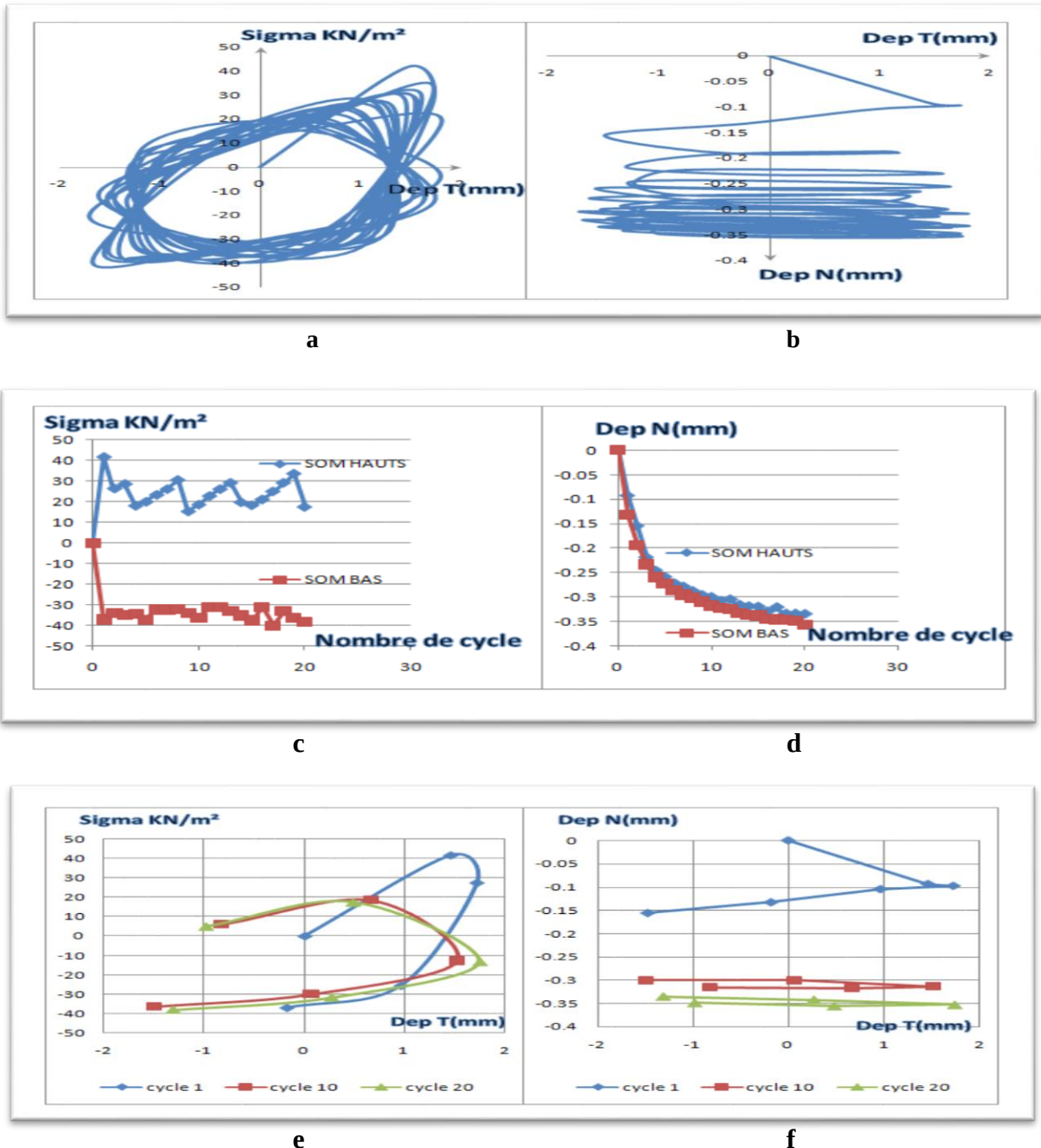


Figure : III. 11. Essais de cisaillement à contrainte normale constante $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 20

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

Essais cycliques en déplacement tangentiel contrôlé ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$). Trois essais de cisaillement cyclique ont été effectués dans le but d'étudier l'effet de la forme et de l'amplitude des cycles sur le comportement cyclique de l'interface.

Le premier essai a été réalisé avec un chargement alterné dans le domaine post-pic ($-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.11a à III.11e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $23,84 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 56,26% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,335 mm.

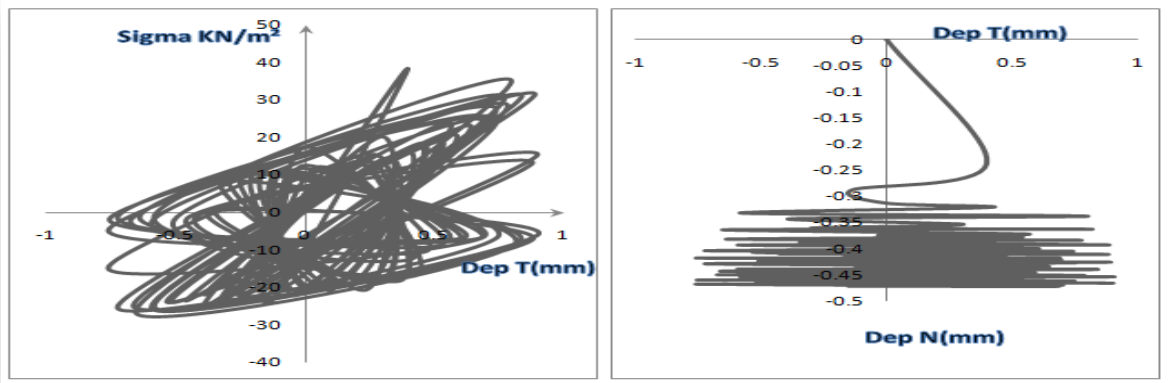
Le deuxième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.12a à III.12e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $13,05 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 34,55% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,77 mm.

Le troisième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude plus faible ($-0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.13a à III.13e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $6,39 \text{ KN/m}^2$ au bout de 60 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 22,55% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

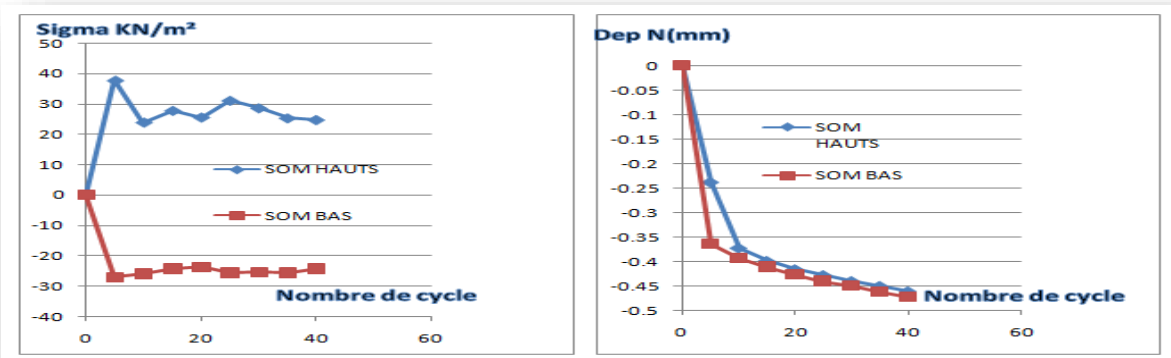
En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,814 mm.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



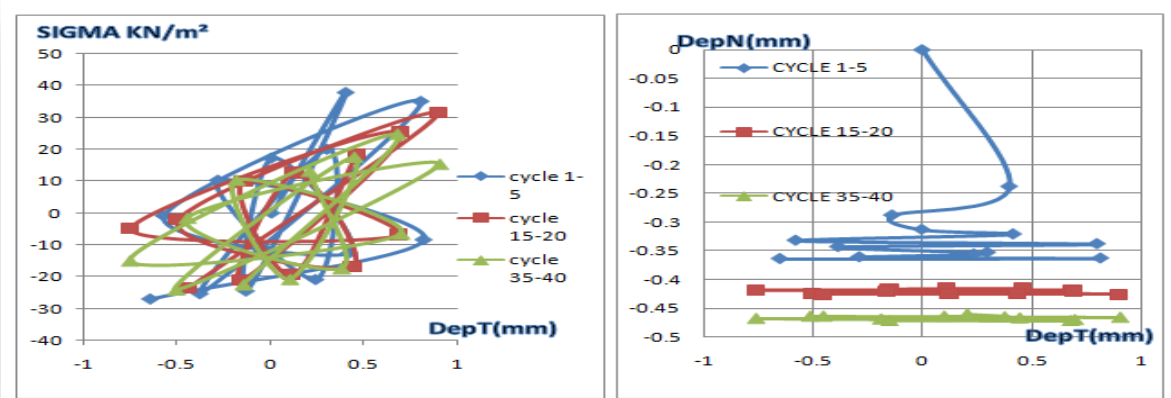
a

b



c

d



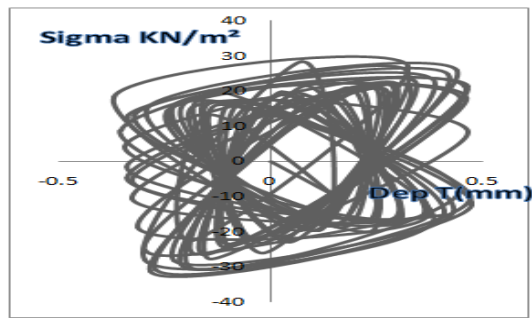
e

f

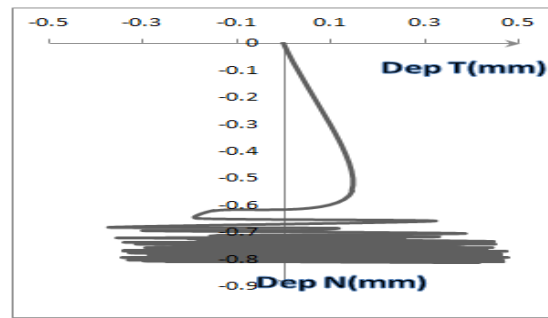
Figure : III. 12. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 40. f: déplacement normal au cycle 1,10et 40

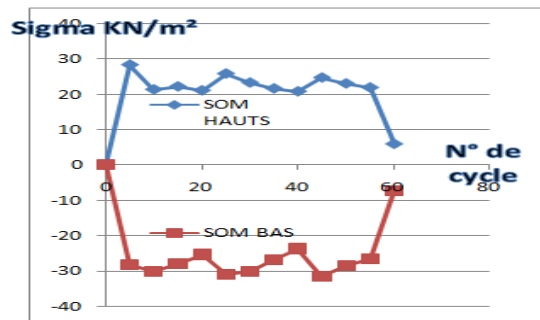
PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



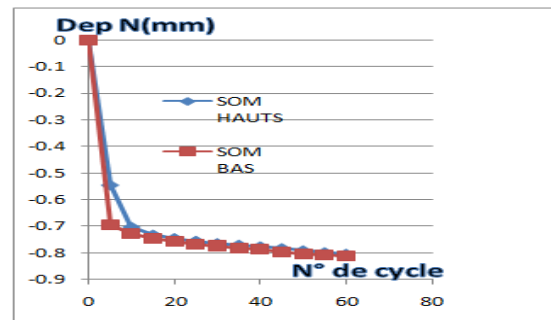
a



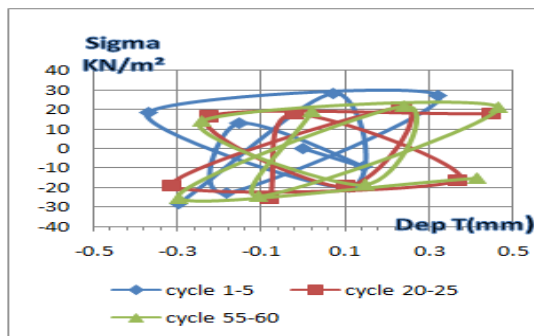
b



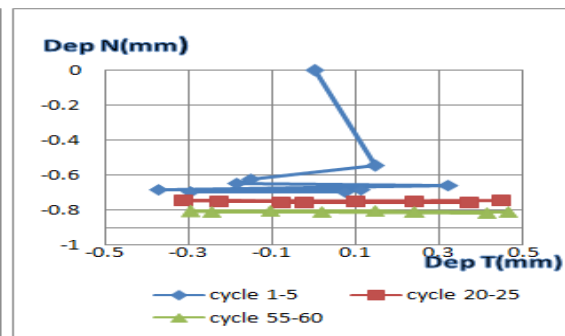
c



d



e



f

Figure : III. 13. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=90\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1↔60. f: déplacement normal au cycle 1↔60.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

✓ **Sable lâche:**

Essais cycliques en déplacement tangentiel contrôlé ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$). Trois essais de cisaillement cyclique ont été effectués dans le but d'étudier l'effet de la forme et de l'amplitude des cycles sur le comportement cyclique de l'interface.

Le premier essai a été réalisé avec un chargement alterné dans le domaine post-pic ($-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.14a à III.14e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de $3,05 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 13,25% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,994 mm.

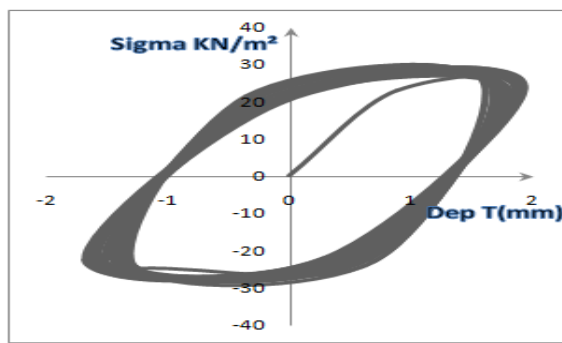
Le deuxième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude faible ($-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.15a à III.15e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif faible. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $6,94 \text{ KN/m}^2$ au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 24,99% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,051 mm.

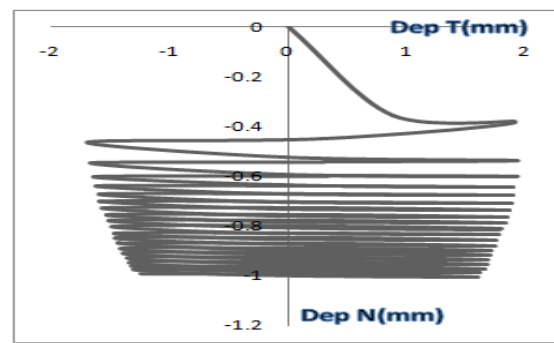
Le troisième essai a été réalisé avec un chargement alterné dans une amplitude plus faible ($-0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.16a à III.16e. On remarque que le chargement cyclique induit un écrouissage négatif. La contrainte de cisaillement au sommet diminue de $9,16 \text{ KN/m}^2$ au bout de 40 cycles ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 26,17% par rapport à la valeur du cisaillement au sommet de premier cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal cumulé par cycle. En fin du chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,404 mm.

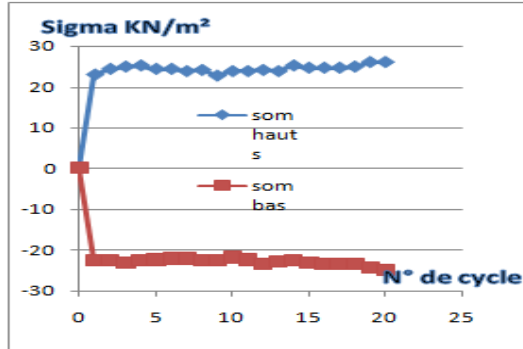
PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



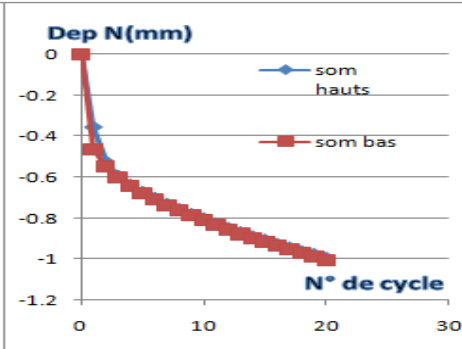
a



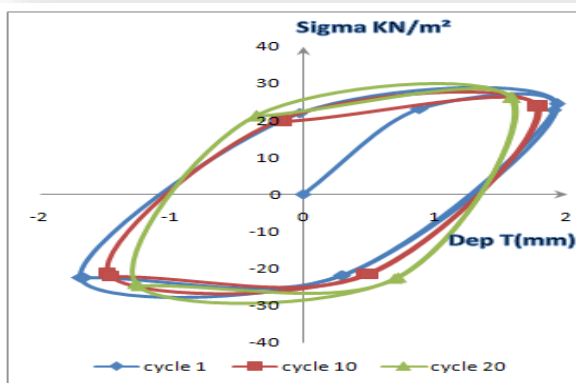
b



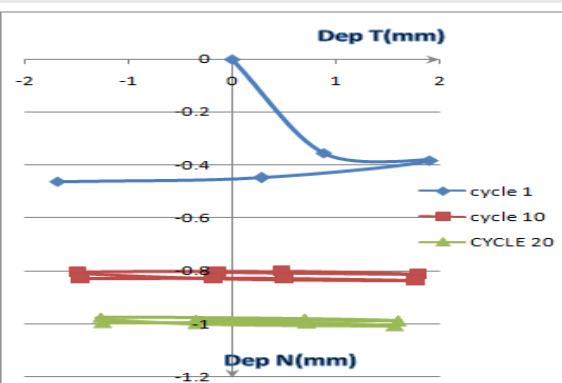
c



d



e



f

Figure : III.14. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$

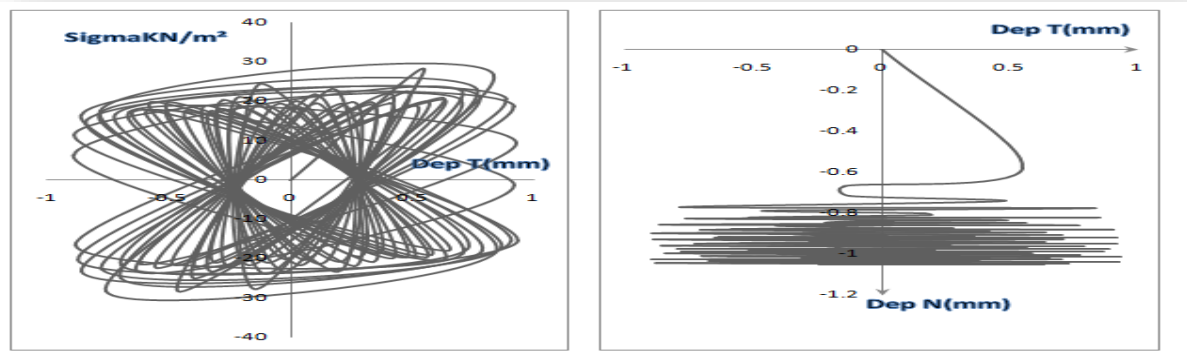
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement normal au cour de cycle

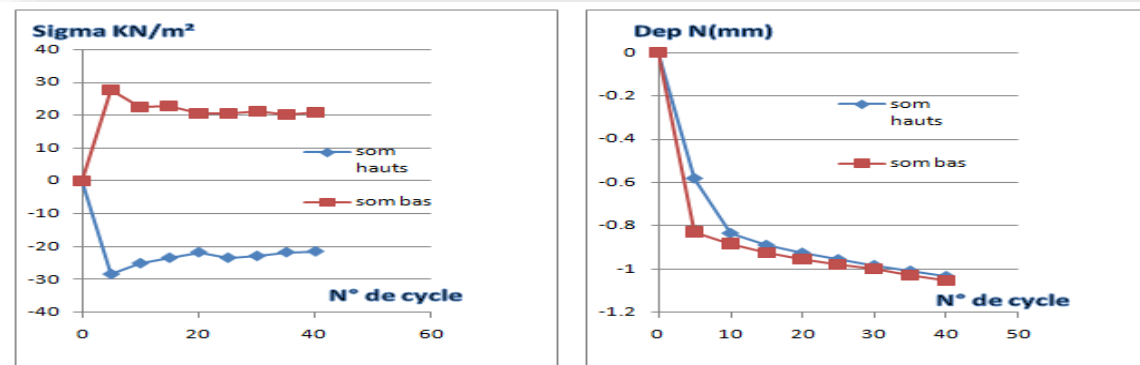
e: la contrainte tangentielle au cycle 1,10et 20. f: déplacement normal au cycle 1,10et 20

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



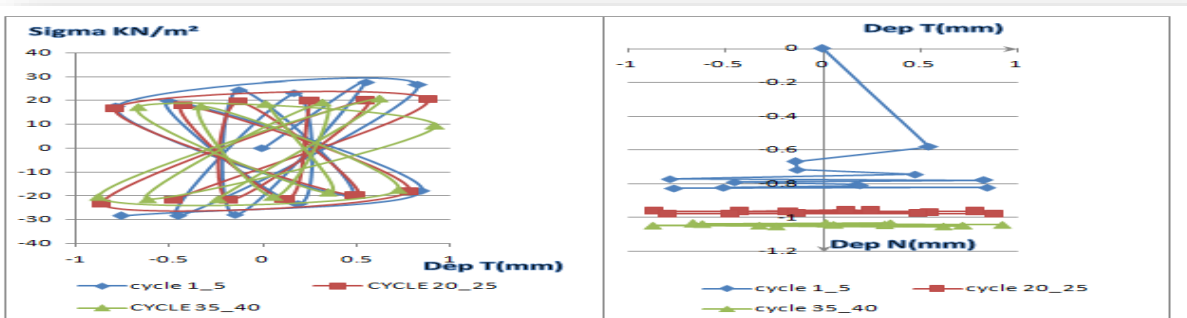
a

b



c

d



e

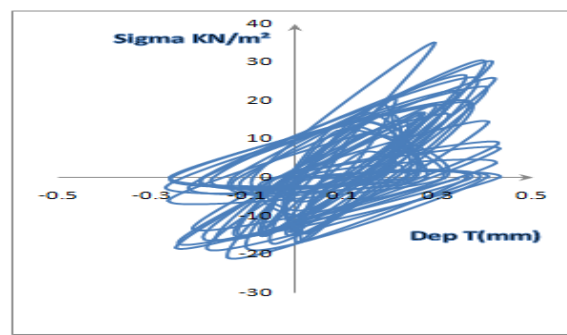
f

Figure : III. 15. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$

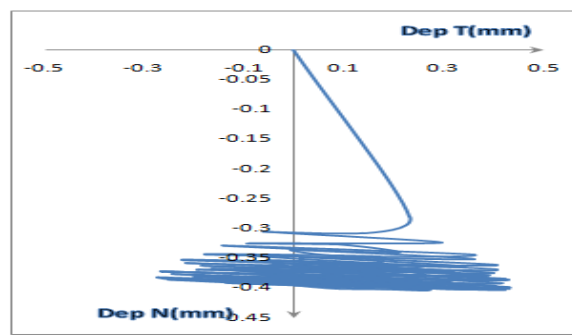
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

- a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
 c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
 e: la contrainte tangentielle au cycle 1↔40. f: déplacement normal au cycle 1↔40

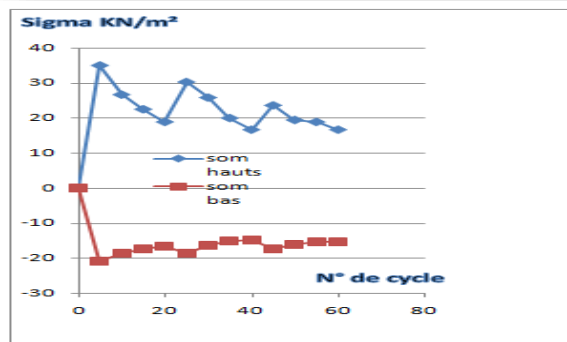
PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



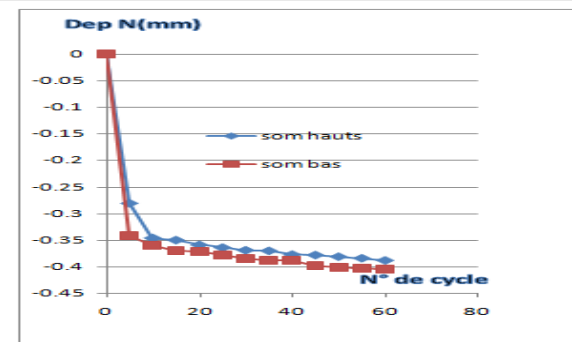
a



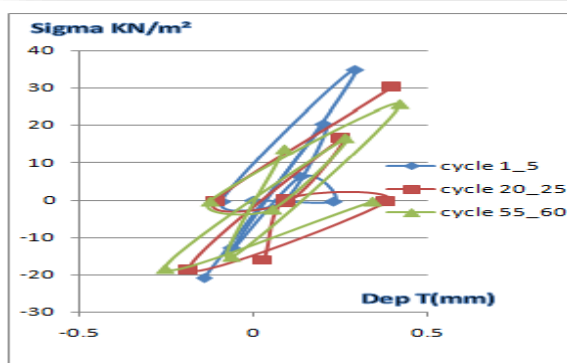
b



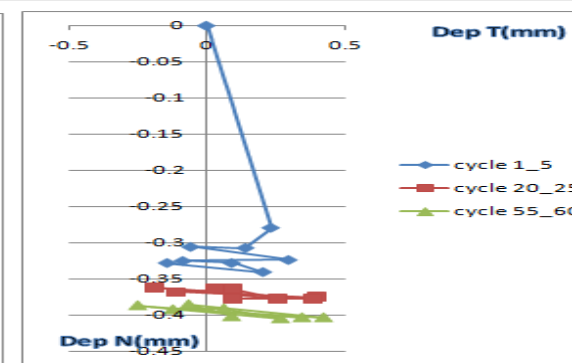
c



d



e



f

Figure : III. 16. Essais de cisaillement à contrainte normale constante, $0,5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0,5 \text{ mm}$
Surface lisse (acier), sable des dunes ($I_d=15\%$)

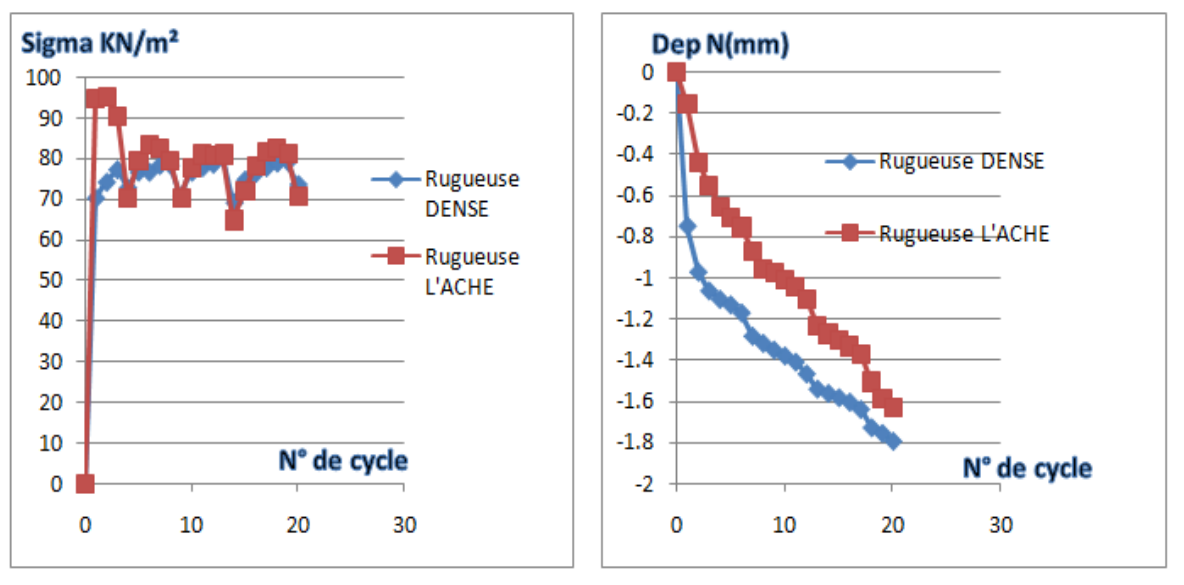
a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal
c: la contrainte tangentielle au cour de cycle. d: déplacement au cour de cycle normal
e: la contrainte tangentielle au cycle 1↔60. f: déplacement normal au cycle 1↔60.

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES

III.3.3.Effet de la densité initiale et de la rugosité de la surface

Afin de montrer l'influence de la rugosité de la surface d'interface et de la densité initiale du sable sur le comportement mécanique de l'interface, nous avons reporté dans les figures III.17 à III.22 les résultats des essais à contrainte normale constante. Une analyse de ces résultats montre que le comportement cyclique de l'interface est très influencé par la densité initiale du sable. On note que ce type de chargement induit un écrouissage cyclique qui se traduit, selon la densité du sol et le niveau de chargement, par un durcissement (sable lâche) ou un radoucissement (sable dense avec un chargement dans le domaine post-pic) de l'interface. On note également que le déplacement normal cumulé diminue avec la densité du sable.

Par ailleurs, la rugosité de l'interface affecte sensiblement son comportement. On note que l'écrouissage cyclique se stabilise plus rapidement dans le cas d'une surface lisse et que le déplacement normal cumulé est plus fort dans le cas d'une surface rugueuse (Figures III.23 et III.24).



a

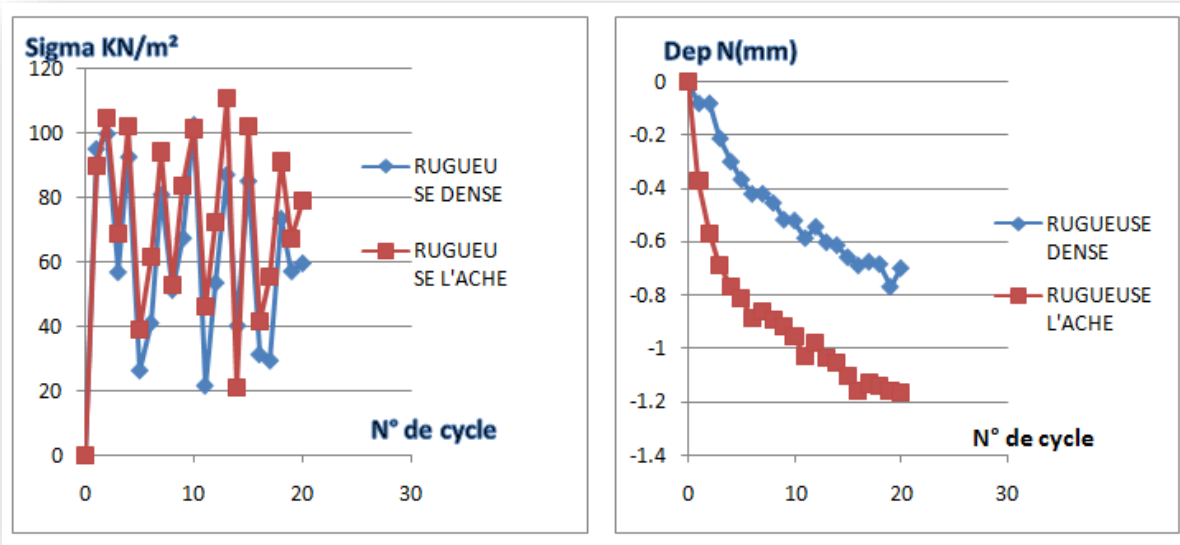
b

Figure : III.17. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface rugueuse (acier), $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



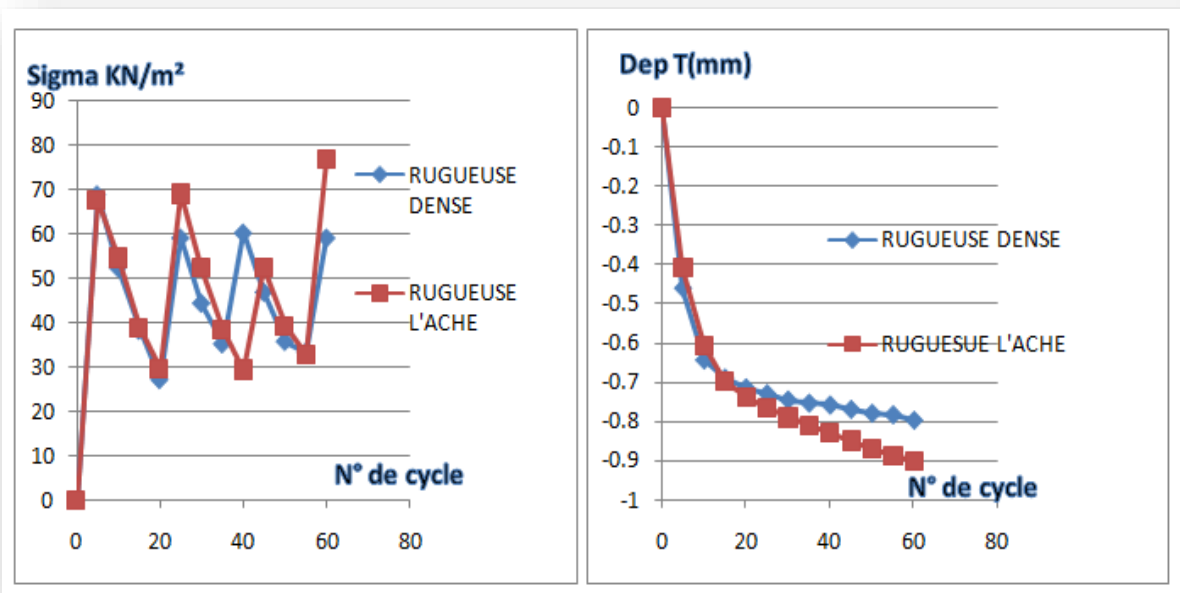
a

b

Figure : III.18. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface rugueuse (acier), $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal



a

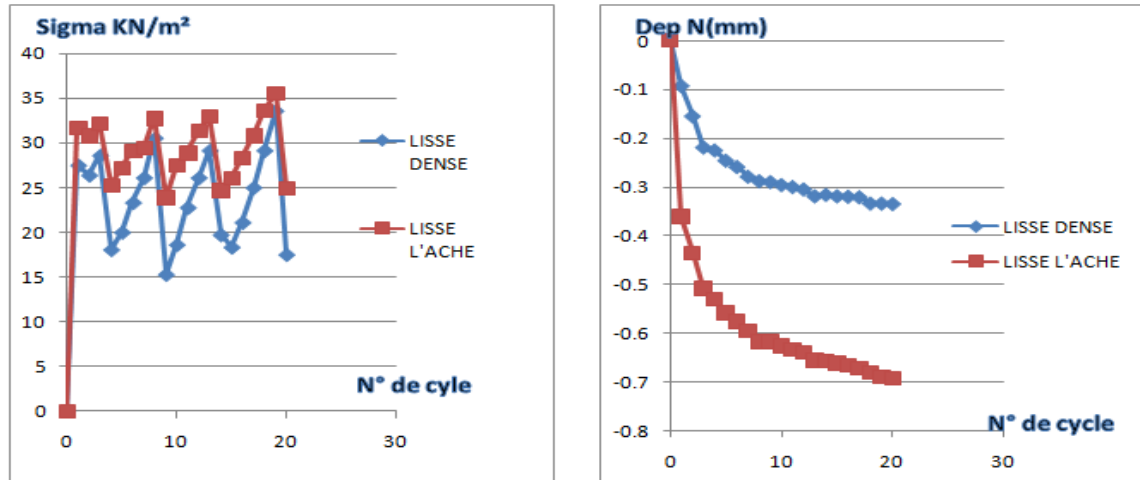
b

Figure : III.19. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface rugueuse (acier), $-0.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0.5 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



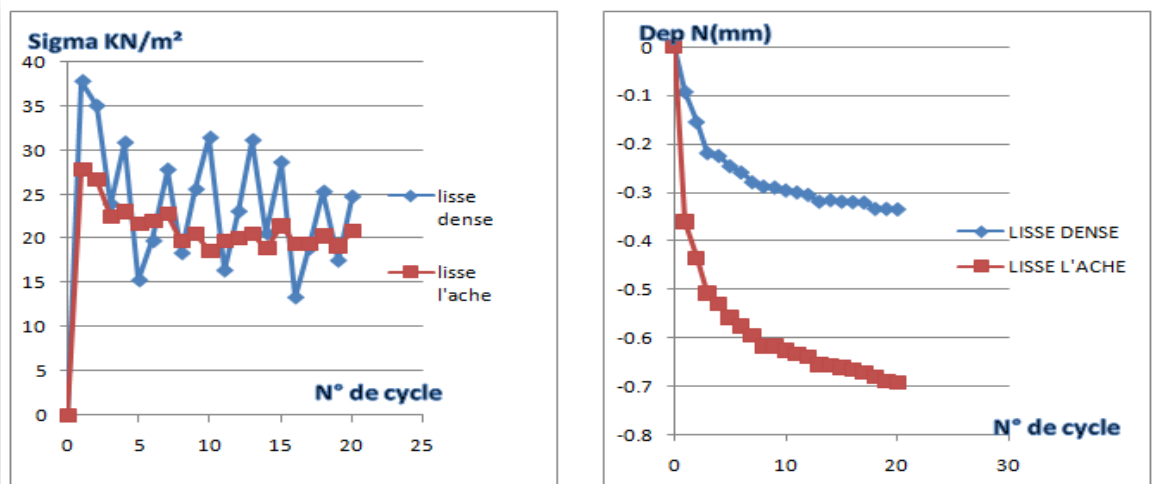
a

b

Figure : III.20. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface Lisse (acier), $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal



a

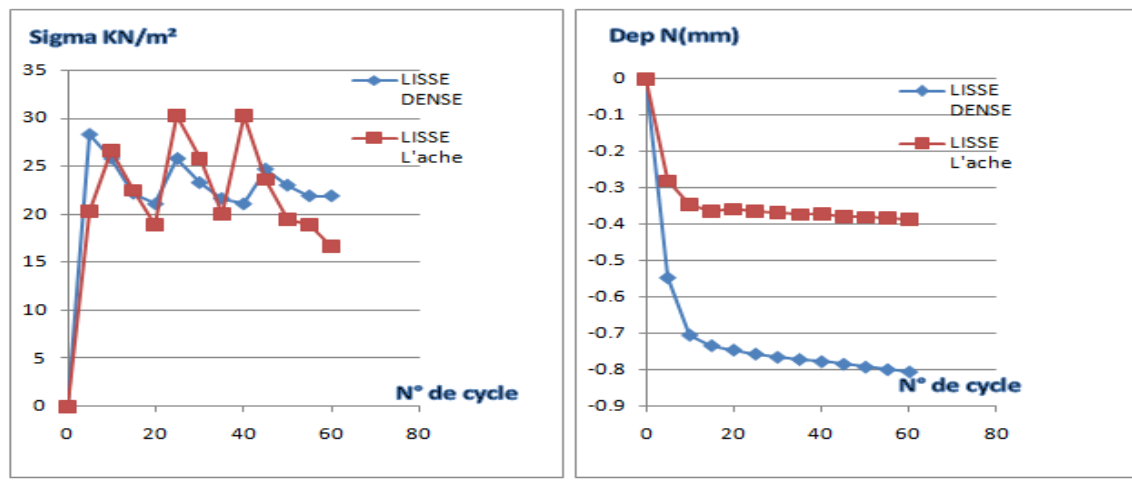
b

Figure : III.21. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface Lisse (acier), $-1 \text{ mm} \leq \lambda \leq +1 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



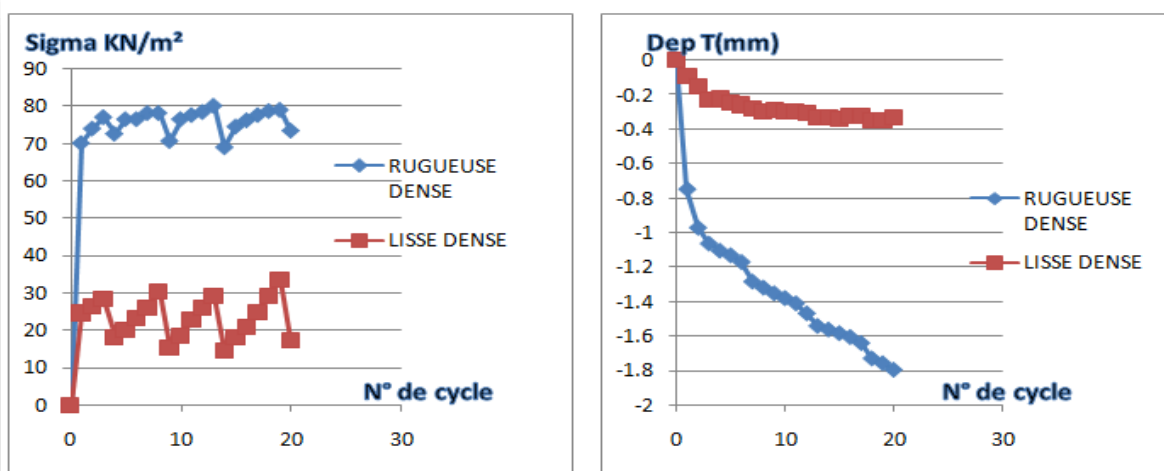
a

b

Figure : III.22. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, Surface Lisse (acier), $-0.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq +0.5 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal



a

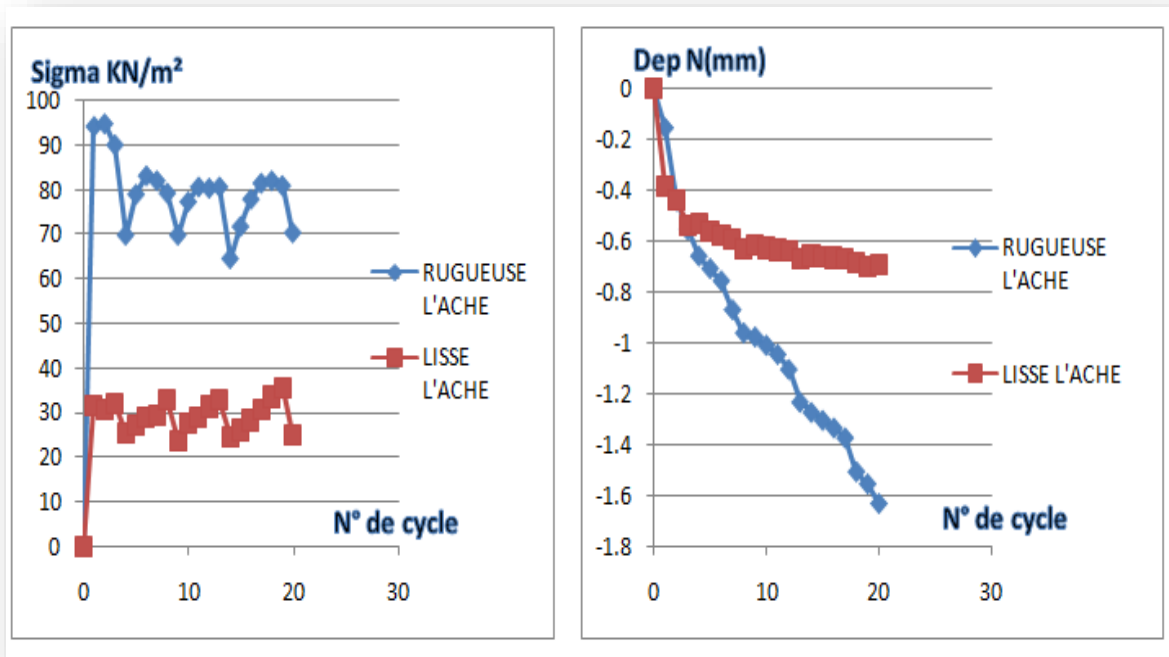
b

Figure : III.23. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable dense ($I_d=90\%$) (acier), $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

PRESENTATION DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES



a

b

Figure : III.24. Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable l'ache ($I_d=15\%$) (acier), $-2 \text{ mm} \leq \lambda \leq +2 \text{ mm}$

a: Évolution de la contrainte tangentielle. b: Évolution du déplacement normal

III.4.CONCLUSION :

Après la détermination du comportement de l'interface sol-structure de notre sol à partir des essais au laboratoire, et après l'étude de l'influence de principaux paramètres (la rugosité, la densité initiale et la contrainte normale initiale) sur le comportement de l'interface sol-structure, on va faire dans le prochain chapitre une simulation des essais d'interface par logiciel **Plaxis**.

Modélisation du comportement d'un sol :

Généralement les sols et les roches tendent à se comporter d'une manière frottement non linéaire sous l'effet d'un chargement. Ce comportement non linéaire en contraintes-déformations peut être modélisé suivant différents niveaux de sophistication. Mais le nombre de paramètres à introduire dans les modèles augmente avec ce degré de sophistication.

Le modèle bien connu de Mohr-coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young, E , le coefficient de poisson, ν , la cohésion, c , l'angle de frottement, ϕ , et l'angle de dilatance, ψ . Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données, une attention particulière sera portée à ce modèle classique de comportement. PLAXIS contient également des modèles de sols plus avancés ; ces modèles sont décrits dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV

MODELISATION DU

COMPORTEMENT D'INTERFACE

SOL-STRUCTURE

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Chapitre IV : MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE SOL-STRUCTURE

1^{ère} PARTIE:

IV.1. PRÉSENTATION DE *PLAXIS* :

IV.1. Introduction :

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers.

IV1.1. Le code éléments finis *PLAXIS* :

Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis *PLAXIS* représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide.

Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné.

A- Options par défaut et solutions approchées :

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui sont un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

B- Les options par défaut commencent dès le maillage:

L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.

C- De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements:

Si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité.

L'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple).

D-Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS :

Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux.

Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ce champ de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède ; PLAXIS offre cette possibilité qui est souvent très appréciable.

E- La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse :

L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix détaillés d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... etc. ; s'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

Le coefficient de sécurité est une notation un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS. Le critère de rupture est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

F- Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats :

Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées.

IV.1.2. Les modèles de comportement utilisés dans *PLAXIS* :

1. Introduction :

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par élément finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation.

La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important.

La démarche suivie dans le développement du code *PLAXIS* est différente. Un des objectifs de *PLAXIS* est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délais raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. En ce sens, *PLAXIS* peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans *PLAXIS* sont des modèles qui peuvent

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

apparaître simple, voire simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ... etc.), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastiques et le modèle de *Mohr-Coulomb* sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élastoplastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter d'une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écrouissage. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le ***Soft Soil Model*** qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastiques peut être justifié.

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- Quel est le comportement principal à modéliser ?
- utiliser un modèle qui décrit ce comportement ;
- interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.

En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

❖ ***Les modèles utilisés dans Plaxis sont :***

1. Modèle élastique linéaire
2. Modèle de Mohr-Coulomb
3. Modèle de sol avec écrouissage (*Hardening Soil Model*)
4. Modèle pour sols mous (*Soft Soil Model*)
5. Modèle pour sols mous avec effet du temps (*Soft Soil Creep Model*)

IV.1.2.2. Contraintes totales, effectives et pressions interstitielles :

Le comportement des sols est régi par les propriétés du squelette ; il est donc nécessaire d'utiliser des contraintes effectives et d'écrire des lois de comportement en contraintes effectives. La pression interstitielle générée dans les ouvrages est une conséquence du non variation de volume ; celle ci est elle même dépendante de la perméabilité du sol. Un sable peut être non drainé in situ sous des sollicitations sismiques (rapides) de même qu'une argile est toujours non drainée à court terme.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Les variations de volumes empêchées par les perméabilités créent des pressions interstitielles ; en fait, celles ci dépendent des variations de volume ; en élasticité, si les grains de sols sont incompressibles, on démontre que :

$$\Delta u_w = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \dots\dots\dots 4.1$$

Où Δu_w est la surpression interstitielle, n la porosité, K_w le module volumique de l'eau et $\Delta \varepsilon_v$ est un incrément de déformation volumique.

Des calculs en contraintes totales sont possibles. Ils permettent par exemple, des calculs de tassements et de stabilité de remblai après construction. Ces calculs ignorent la génération de pressions interstitielles. Ils présentent l'avantage d'être simples et de se recalcr par rapport à des calculs plus classiques de stabilité à court terme.

Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai.

IV.1.2.3. Comportement élastoplastiques :

Le comportement élastoplastiques peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil S_0 (figure 4.1).

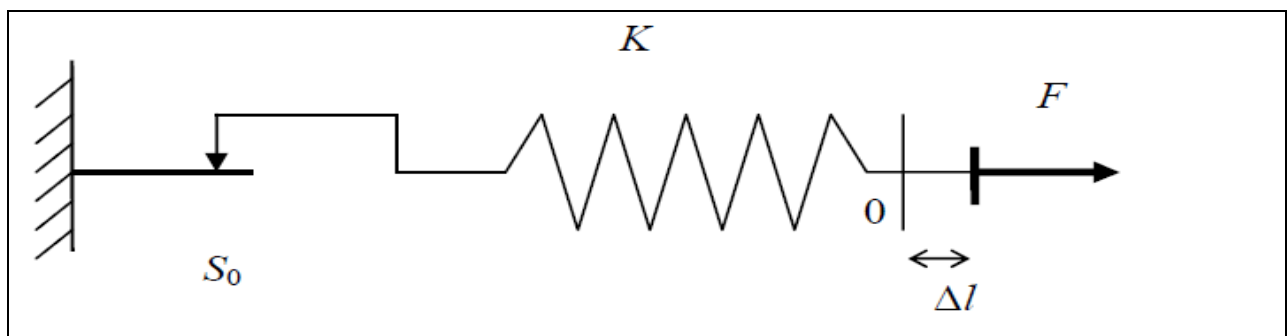


Figure : IV.1.Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastiques

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure [4.2].

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

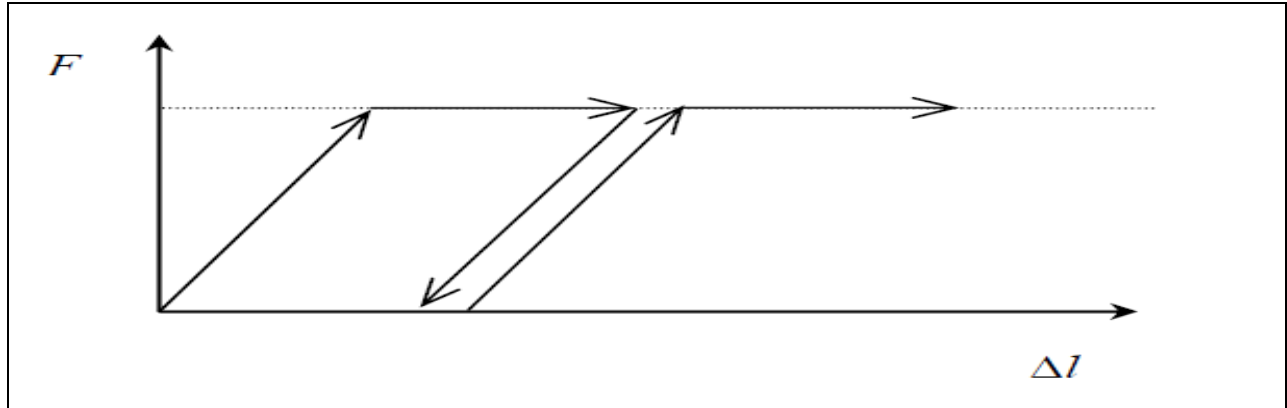


Figure. IV.2.*Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.*

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par les figures [4.1 et 4.2] est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure [4.3] représente un comportement élastique-plastique avec écrouissage.

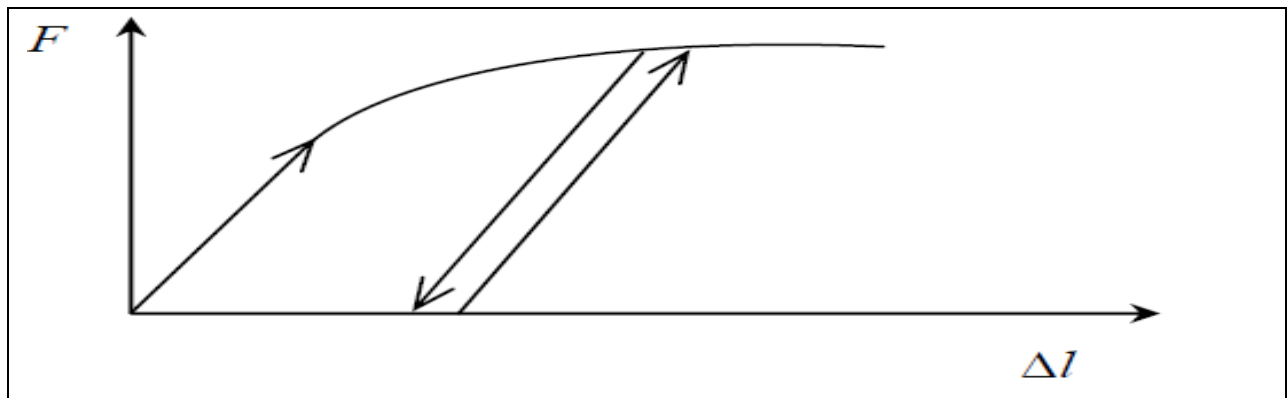


Figure. IV.3 : *Représentation du comportement élastoplastiques avec écrouissage.*

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.1.2.4. Modèle de Mohr-Coulomb :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écoulement. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c ; \dots\dots\dots 4.2$$

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau figure [4.4].

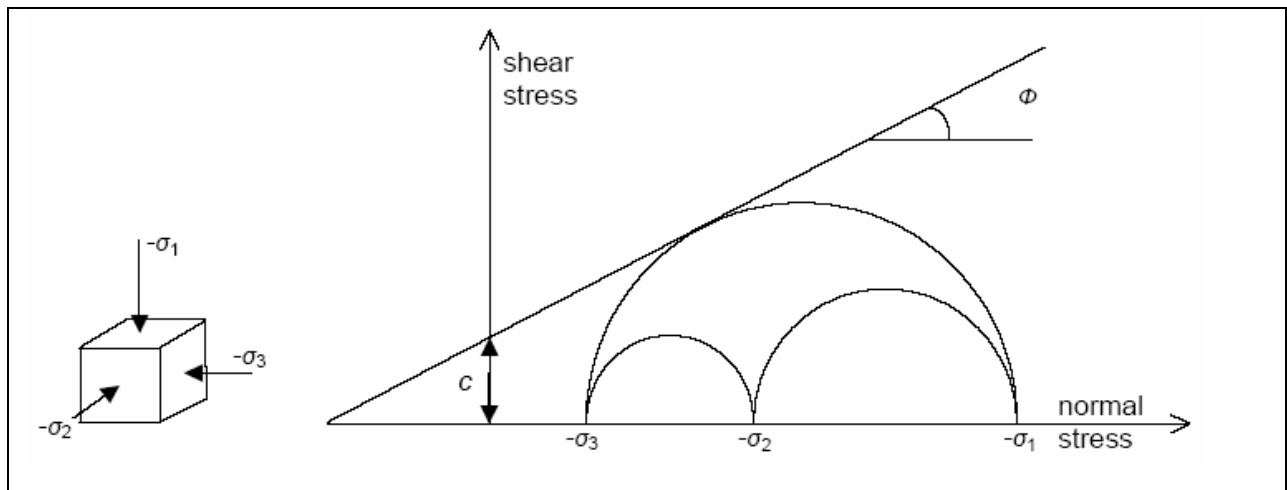


Figure. IV.4. Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

Le modèle demande la détermination de cinq paramètres figure [4.5]. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et φ , respectivement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

The screenshot shows a software window titled "Mohr-Coulomb - SABLELACHE" with three tabs: "General", "Parameters", and "Interfaces". The "Parameters" tab is active. It contains four groups of input fields:

- Stiffness:**
 - E_{ref} : 4.100E+04 kN/m²
 - ν (nu): 0.300
- Strength:**
 - c_{ref} : 0.190 kN/m²
 - ϕ (phi): 39.790 °
 - ψ (psi): 9.790 °
- Alternatives:**
 - G_{ref} : 1.577E+04 kN/m²
 - E_{oed} : 5.519E+04 kN/m²
- Velocities:**
 - V_s : 99.590 m/s
 - V_p : 186.300 m/s

At the bottom right of the parameter area is an "Advanced..." button. At the bottom of the window are four buttons: a blue button, "SoilTest", "Next", "OK", and "Cancel".

Figure. IV.5.Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

a) Module d'Young :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant.

Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au M_{ax} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux.

Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture figure [4.6].

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

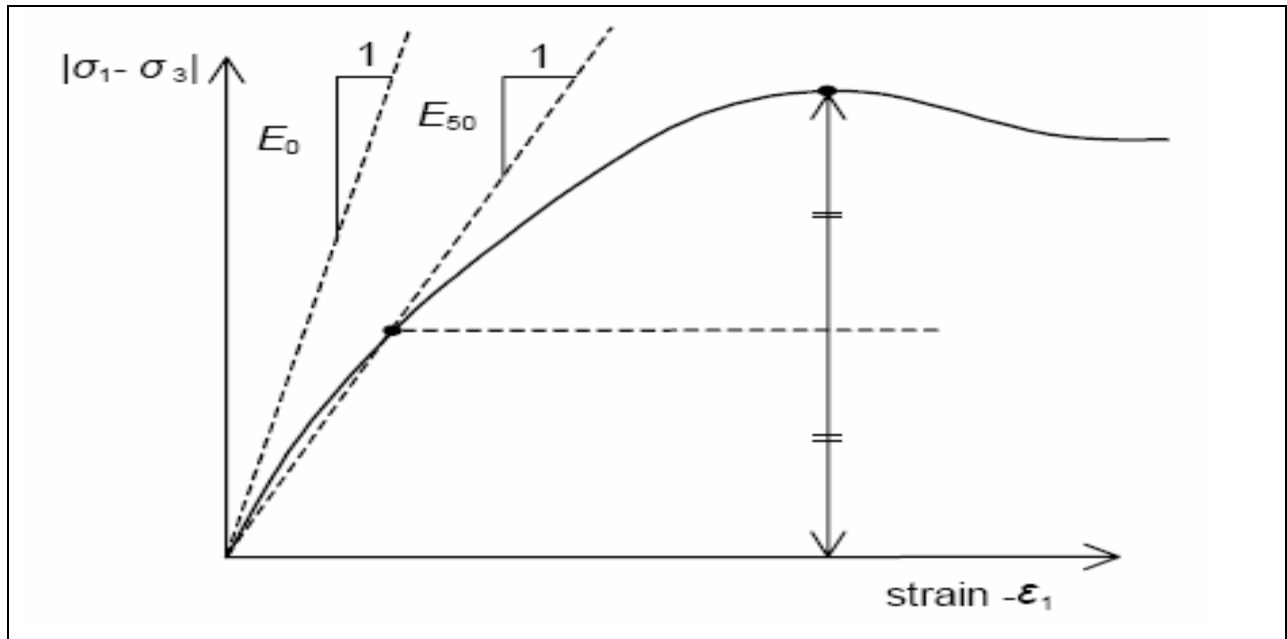


Figure. IV.6. Définition du module à 50 % de la rupture.

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

b) Coefficient de Poisson :

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) Angle de frottement :

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger Les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement ϕ_{cv} (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb figure [4.4].

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

d) Cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec $\phi_u = 0$, *PLAXIS* offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : Ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre *c-depth*. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (typiquement en kPa/m).

e) Angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$\psi = \phi - 30^\circ$	pour	$\phi > 30^\circ$.
		$\psi = 0^\circ$ pour $\phi < 30^\circ$.

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique).

La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

f) Les paramètres avancés :

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés Figure [4.7].

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Advanced parameters Mohr-Coulomb

Stiffness
 $E_{\text{increment}}$: 0.000 kN/m²/m
 y_{ref} : 0.000 m

Strength
 $c_{\text{increment}}$: 0.000 kN/m²/m
 y_{ref} : 0.000 m
☒ Tension cut off
Tensile strength : 0.000 kN/m²

Undrained behaviour
☒ Standard settings
☐ Manual settings
Skempton-B : 0.978
 v_u : 0.495
 $K_{w,\text{ref}} / n$: 1.537E+06 kN/m²

Consolidation
 $C_{v,\text{ref}}$: N/A m²/day

$$C_{v,\text{ref}} = \frac{k_y \cdot E_{\text{oed}}}{\gamma_w}$$

Default OK Cancel

Figure. IV.7.Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.

IV.1.3.Calcul :

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (*Calculation*). PLAXIS permet d'effectuer différents types de calculs aux éléments finis.

Le programme de calcul ne traite que de l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique (*Plastic calculation*), une analyse de consolidation (*Consolidation analysis*), un calcul de coefficients de sécurité (*Phi-c réduction*) ou un calcul dynamique (*Dynamique calculation*).

Cette dernière option requiert le module dynamique de PLAXIS (*PLAXIS Dynamique module*), qui est une extension de la Version 8.

Les trois premiers types de calcul (*plastique, consolidation, Phi-c réduction*) permettent en option de prendre en compte les effets des grands déplacements. Cette option s'appelle *Updated mesh* (mise à jour du maillage) et est disponible comme option avancée. Dans la

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

pratique, un projet peut se décomposer en plusieurs phases. De même, le processus de calcul de PLAXIS est aussi divisé en étapes de calcul. L'activation d'un cas de charge prédéfini, la simulation d'étapes de construction, l'introduction d'une période de consolidation, le calcul d'un coefficient de sécurité sont des exemples de phases de calcul. Chaque phase de calcul est couramment divisée en plusieurs pas de calcul. Cela est dû au fait que le comportement non linéaire du sol nécessite l'application des charges par paliers (incréments de charge). Cependant, dans la plupart des cas, il suffit de préciser l'état à obtenir à la fin de la phase de calcul. Dans PLAXIS, des procédures automatiques et robustes d'incrémentation des pas de chargement assurent un choix approprié des pas de calcul.

IV.1.3.1. Le programme de calcul :

Cette icône représente le programme de calcul (*Calculation*). Celui-ci contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis. La fenêtre de sélection permet un choix rapide entre les quatre projets les plus récents. Si le projet choisi n'apparaît pas dans cette liste, il faut utiliser l'option <<<*More files*>>>. Dans ce cas, le gestionnaire de fichiers apparaît, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires accessibles et de choisir le fichier de projet PLAXIS souhaité (*.plx). Il n'est pas nécessaire de choisir un projet quand on clique sur le bouton *Calculate* depuis la fenêtre des conditions initiales du programme d'entrée des données. Dans ce cas, le projet en cours est automatiquement sélectionné dans le programme de calcul. Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît.

IV.1.3.2. Caractéristiques générales des calculs :

Les données introduites à l'aide de l'onglet *General* permettent de définir les caractéristiques générales d'une phase de calcul.

Phase:

Les divers éléments du groupe *Phase* peuvent être utilisés pour identifier une phase de calcul et pour déterminer l'ordre des phases de calcul en sélectionnant celle qui sera prise comme point de départ pour chaque étape de calcul.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Calculation type:

Les choix faits dans les deux cases du groupe *Calculation type* déterminent le type de calcul utilisé

Comment et log info:

La case *Log info* affiche les messages générés pendant le calcul aux éléments finis. La case *Comment* permet de stocker les informations relatives à une phase de calcul en particulier.

IV.1.3.3.Types de calculs :

Le type de calcul d'une phase (*Calculation type*) est d'abord défini dans le menu déroulant en haut à droite de l'onglet *General*. Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique (*Plastic*), une analyse de consolidation (*Consolidation*) et un calcul de coefficient de sécurité (*Phi-c réduction*).

Un calcul dynamique (*Dynamique*) est disponible en option dans le menu déroulant, mais il requiert le module PLAXIS Dynamics, qui est une extension de la Version 8.

IV .1.3.4 Le module dynamique de Plaxis :

Le code Plaxis nous permet d'étudier un problème dynamique. La charge dynamique est généralement appliquée le long du substratum de la structure. Cette action peut être représentée par une force, vitesse, ou une accélération variable en fonction du temps.

Le code Plaxis offre deux types d'analyse aux chargements sismiques :

- ❖ une analyse pseudo-statique (de plus de la gravité normale, l'utilisateur peut prescrire une accélération indépendante pour modéliser des efforts dynamiques dans une analyse pseudo-statique).
- ❖ une analyse dynamique (par exemple à partir d'accélérographes appliqués à la base du modèle) qui est une option de module dynamique complémentaire.

A-Equation de base du comportement dynamique en Plaxis

L'équation de base du mouvement de déplacement d'un volume sous l'influence du chargement dynamique c'est :

$$Mu'' + Cu' + Ku = F$$

M : Matrice de masse.

C : Matrice d'amortissement.

K : Matrice de rigidité.

u : Vecteur de déplacement.

u' : La vitesse.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

u'' : L'accélération

La matrice M est une matrice de masse qui prend en considération le sol, l'eau et toutes les constructions. La matrice C représente l'amortissement des matériaux, dans la réalité cet amortissement dû au frottement ou dû à la déformation irréversible (plasticité ou viscosité). Plus la viscosité augmente plus l'énergie de vibration est dissipée.

Pour déterminer la matrice d'amortissement d'autres paramètres sont demandés. Généralement la matrice d'amortissement est formulée à partir de la matrice de masse et la matrice de rigidité d'après la formule de Rayleigh

$$C = \alpha_R M + \beta_R K$$

Si la contribution de M est dominante par ex ($\alpha_R = 10^{-2}$ et $\beta_R = 10^{-3}$) plus les basses fréquences sont amorties.

Si la contribution de K est dominante par ex ($\alpha_R = 10^{-3}$ et $\beta_R = 10^{-2}$) plus les hautes fréquences sont amorties.

B- Le Programme d'entrée de Données (Input)

Dans le programme Input, il faut spécifier quel est le système de chargement qu'on va choisir, pour représenter l'action dynamique par l'option (*set dynamic load system*).

Dans la présente partie, la fonctionnalité pour une analyse dynamique par Plaxis est suivie dans l'explication ci-après :

- ❖ La fenêtre des réglages généraux (General settings)
- ❖ Charges et Conditions aux Limites (Loads and Boundary conditions)
- ❖ Déplacements Imposés (Prescribed displacements)
- ❖ Paramètres élastiques (Elastic parameters)
- ❖ Amortissement matériel (Material damping)
- ❖ Les bandes absorbantes (Absorbent boundaries)

Les bandes absorbent les incréments des contraintes sur les parois de la surface modélisée pour éviter le phénomène de la réflexion des charges dynamiques. On peut activer cette option par le choix du (standard absorbent boundaries) du menu charge

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

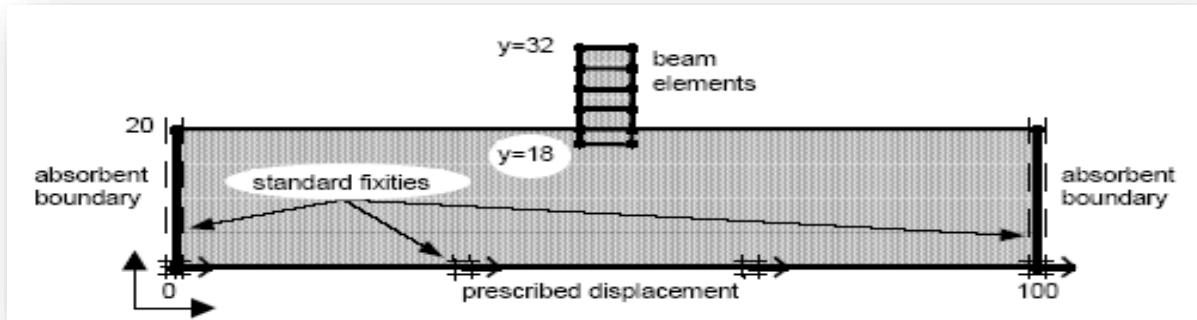


Fig.IV.8. Exemple qui montre les conditions aux limites.

Dans des cas de tremblement de terre la source de chargement dynamique est habituellement appliquée le long du fond du modèle résultant aux ondes de cisaillement qui propagent vers le haut. Ce type de problèmes est généralement simulé avec un modèle de déformation plane. À noter qu'un modèle de déformation plane n'inclut pas l'amortissement géométrique. Par conséquent il peut être nécessaire d'inclure l'amortissement matériel pour obtenir des résultats réalistes.

❖ Amortissement matériel (Rayleigh alpha et beta)

La matrice C représente l'amortissement matériel. En réalité, l'amortissement de matériel est provoqué par frottement ou par des déformations irréversibles (plasticité ou viscosité). Plus de viscosité ou plus de plasticité, plus d'énergie de vibration peut être absorbée ; il est difficile de déterminer à partir des essais. Dans des formulations d'élément finis, C est souvent formulée en fonction des matrices de la masse et de rigidité (Amortissement de Rayleigh):

$$C = \alpha_R M + \beta_R K$$

Avec

K : matrice de rigidité

M : matrice de masse

Les coefficients d'amortissement de Rayleigh α et β peut être déterminés au moins de deux donnés des constantes d'amortissement ξ_i qui correspondent à deux fréquences de vibration ω_i . Le rapport entre α , β , ξ_i et ω_i peut être présenté comme :

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2 \omega_i \xi_i$$

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Si, plus de deux paires de données sont disponibles, des quantités moyennes doivent être faites pour produire deux équations.

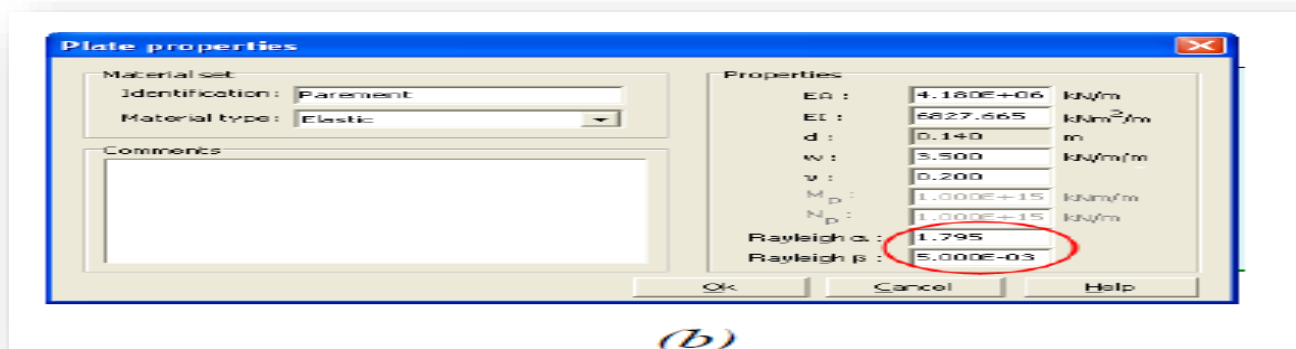
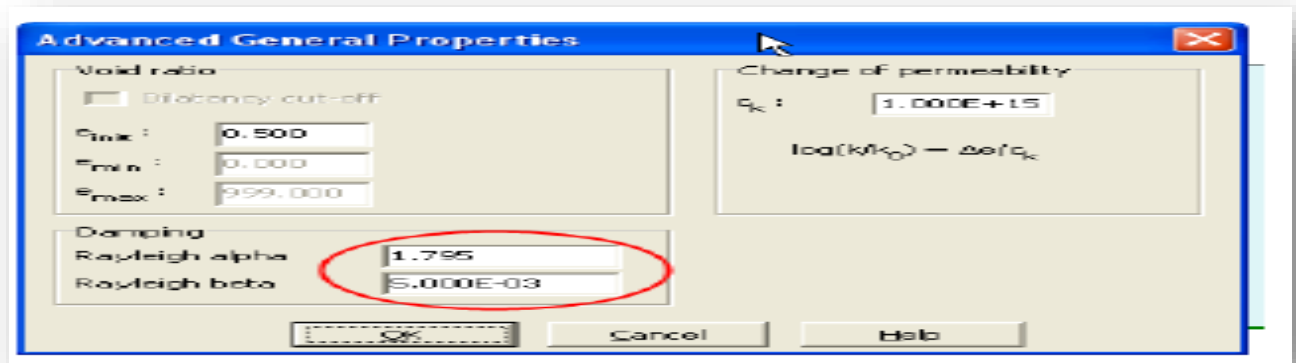
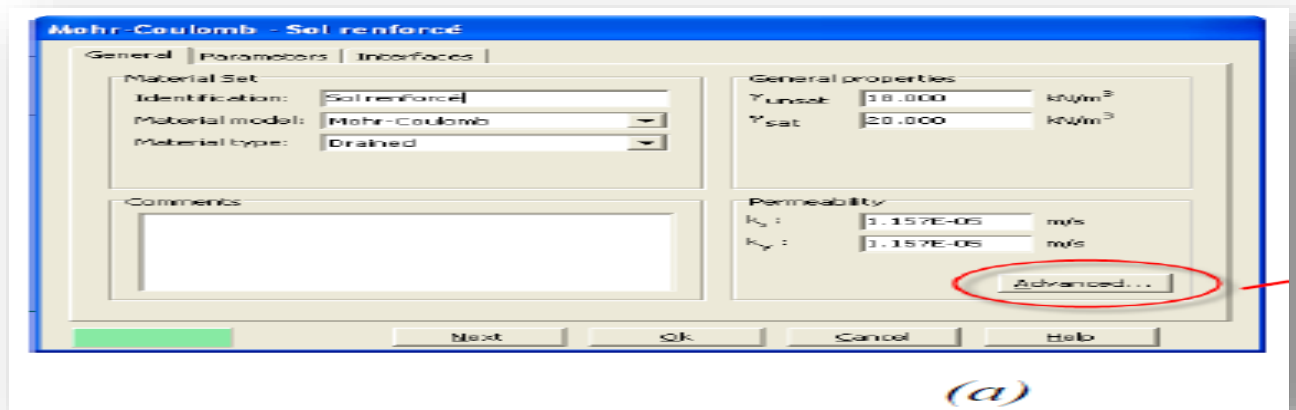


Fig.IV.9. Fenêtres d'entrée des coefficients d'amortissement de Rayleigh α et β .
(a) sols et interfaces (b) éléments Plat

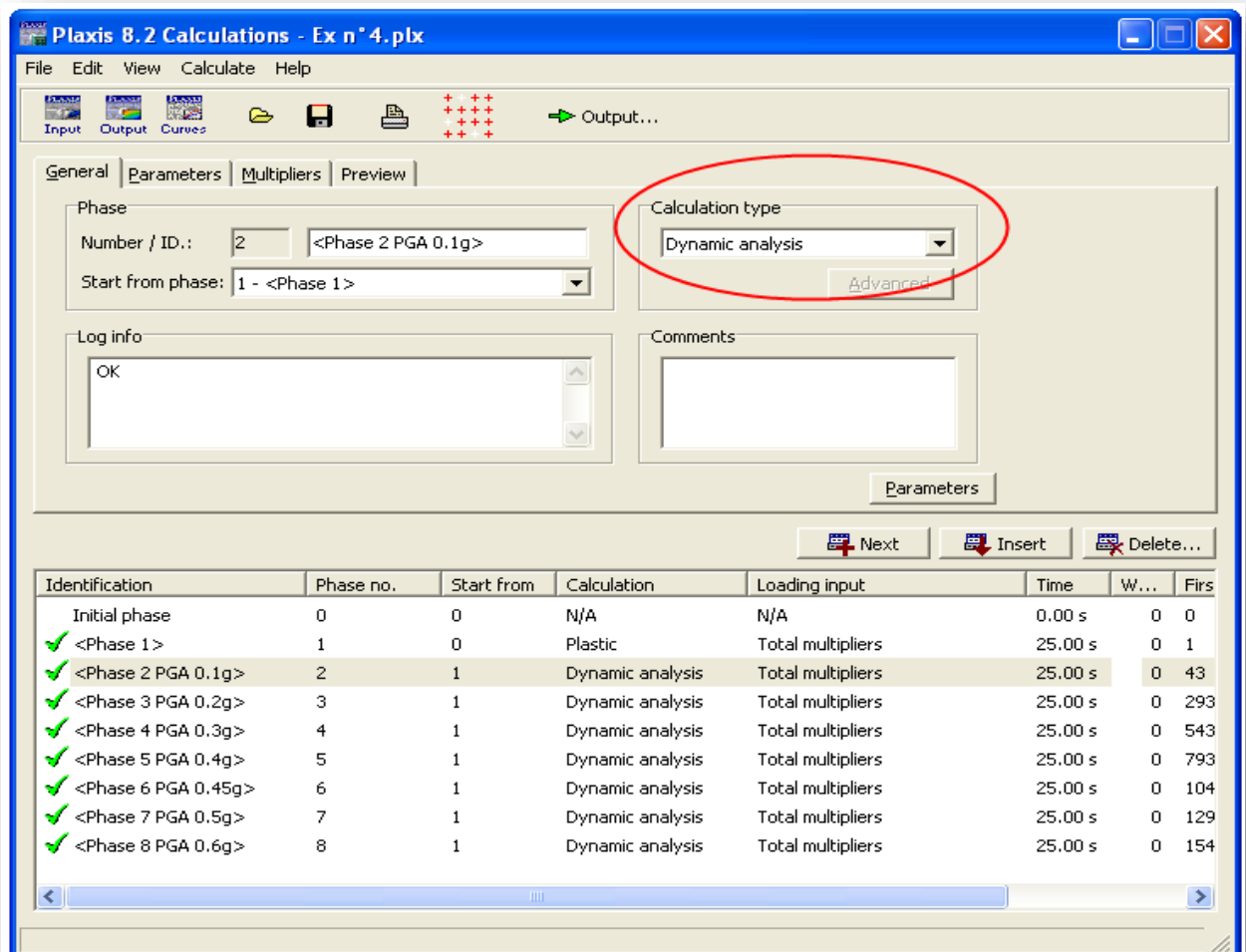
MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

C- Le Programme de Calcul (Calculations):

Dans le programme de calcul on peut traiter la charge dynamique de plusieurs façons un chargement harmonique, ou un chargement arbitraire ; et on peut même modéliser un séisme réel.

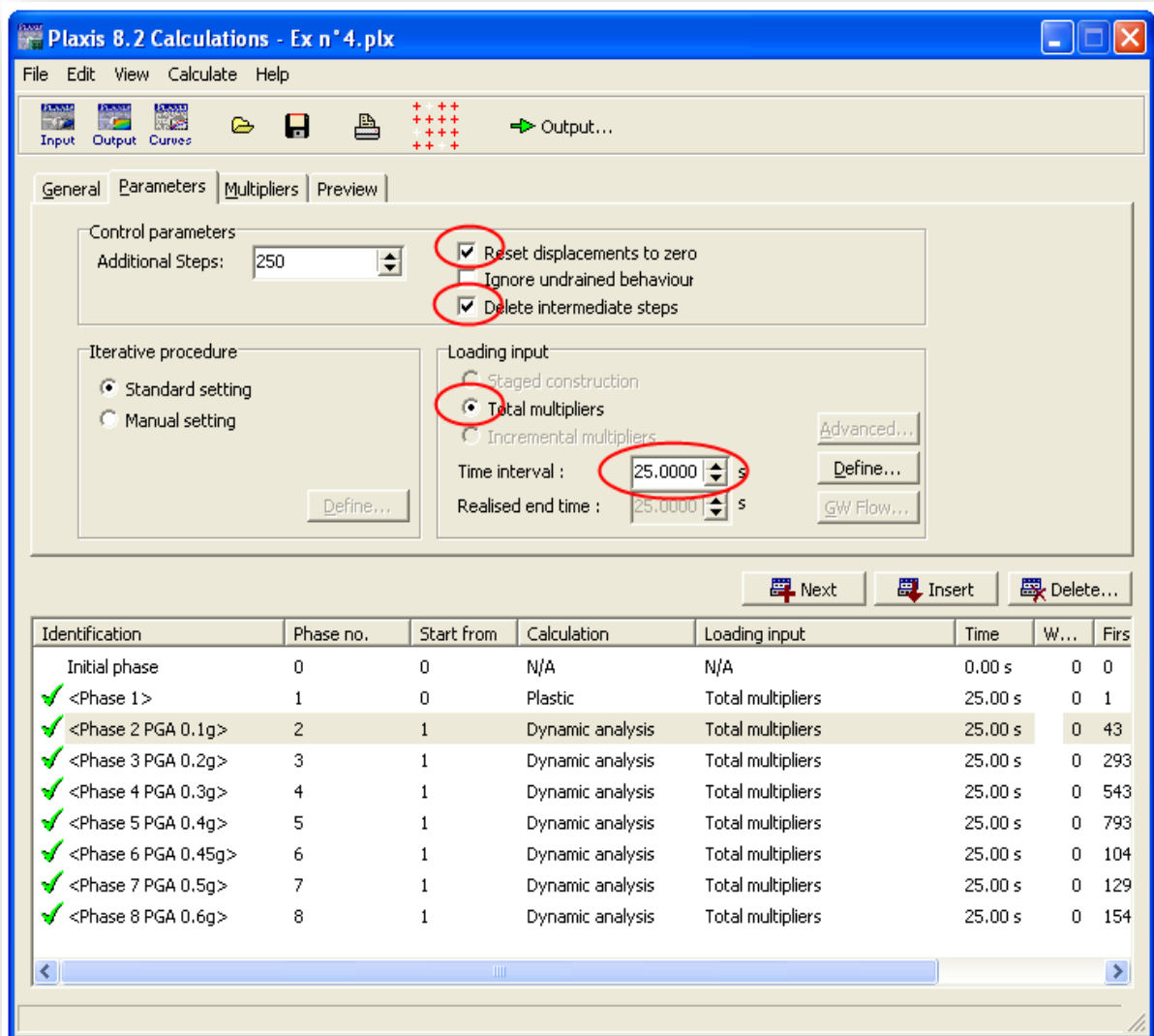
Dans la présente partie, la fonctionnalité pour une analyse dynamique par Plaxis est suivie dans l'explication ci-après:

- ✓ Choissant l'analyse dynamique
- ✓ Paramètres
- ✓ Multiplicateurs
- ✓ Choissant l'analyse dynamique (General)



MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL-STRUCTURE

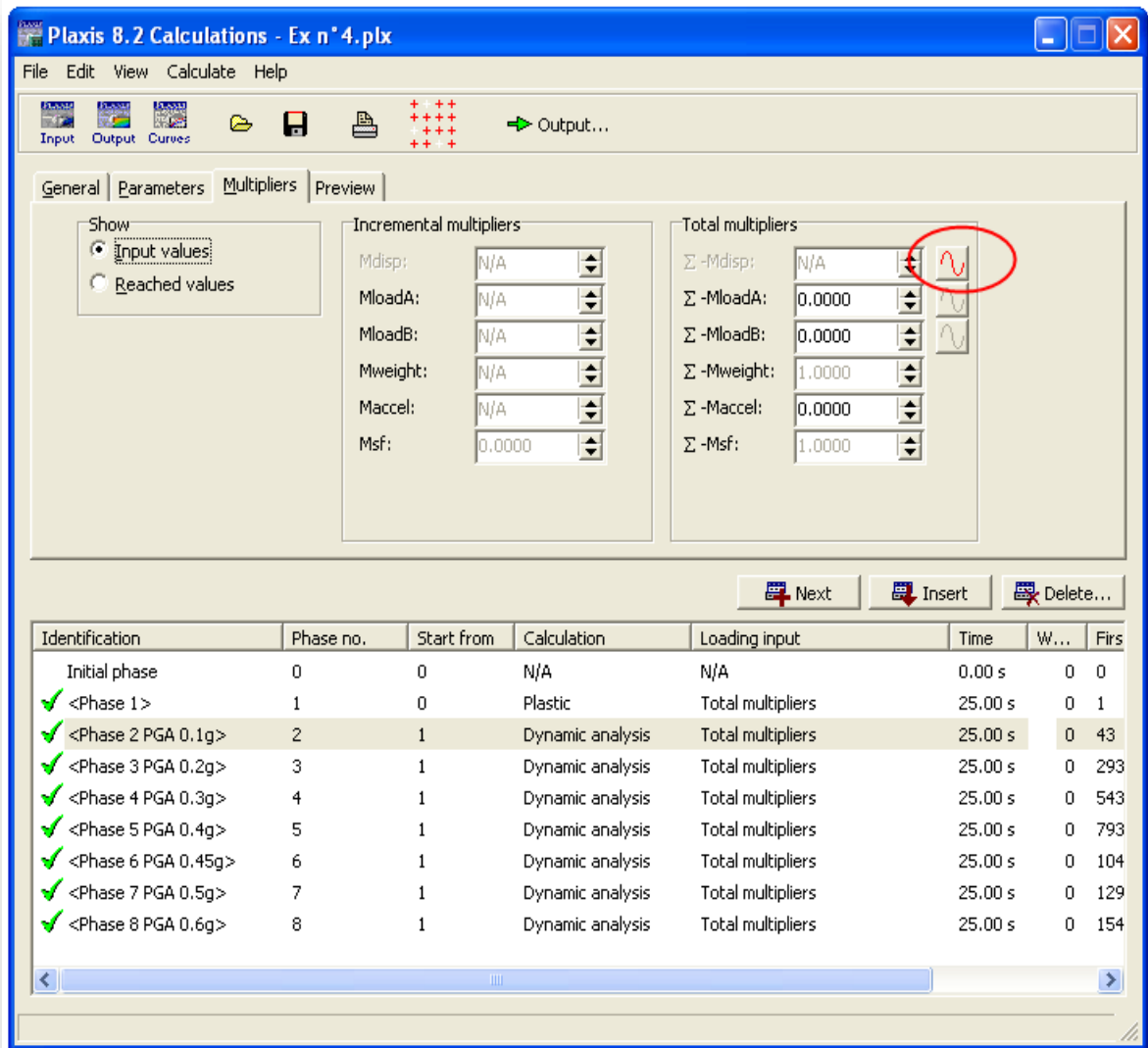
- ✓ Paramètres



- ❖ *Reset displacement to zero* (Remise à zéro des déplacements) : la phase de calcul en cours commence alors avec un champ de déplacements vierge pour suivre bien le comportement de mur sous sollicitation sismique unique.
- ❖ *Delete intermediate steps* (Suppression des pas intermédiaires) : pour préserver de l'espace libre sur le disque.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

✓ Multiplicateurs:

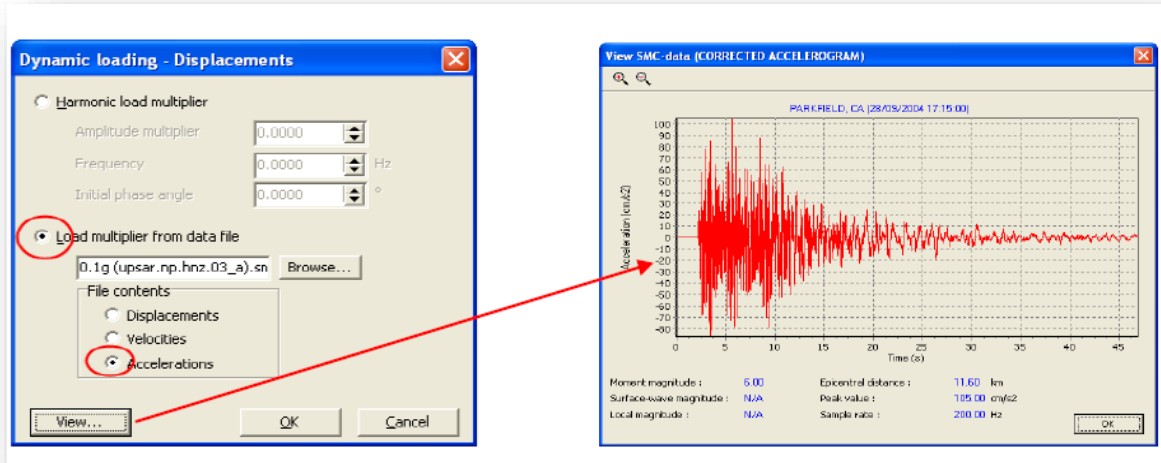


Dans le programme de calcul, des multiplicateurs sont utilisés pour activer les charges dynamiques. Quand l'option analyse dynamique est choisie, vous pouvez cliquer à la droite des multiplicateurs ΣM_{disp} , ΣM_{loadA} et ΣM_{loadB} , le schéma ci-dessus définit les paramètres pour une charge harmonique. Cette option est seulement disponible si la charge correspondante est placée en tant que charge dynamique dans le menu de charges du programme d'entrée.

La charge active qui est employée dans un calcul dynamique est le produit de la valeur d'entrée de la charge, comme spécifique dans le programme d'entrée, et le multiplicateur dynamique correspondant de charge :

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

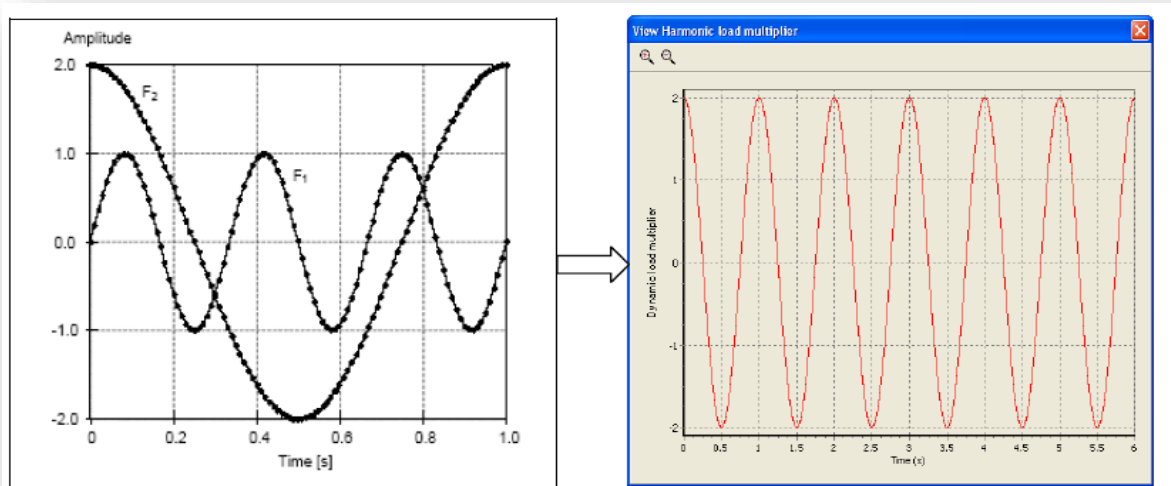
Active load = Dynamic multiplier * Input value



D- Chargement dynamique :

Dans Plaxis, la charge dynamique peut être introduite de trois manières :

❖ A partir d'un chargement harmonique



$$F = 2 \sin(2\pi t + \pi/2)$$

$$F_1 = \sin(6\pi t), F_2 = 2 \sin(2\pi t + \pi/2).$$

Fig.IV.10. Chargement harmonique

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Comme on voit sur la figure 4.8, on peut modifier les caractéristiques du mouvement de vibration harmonique.

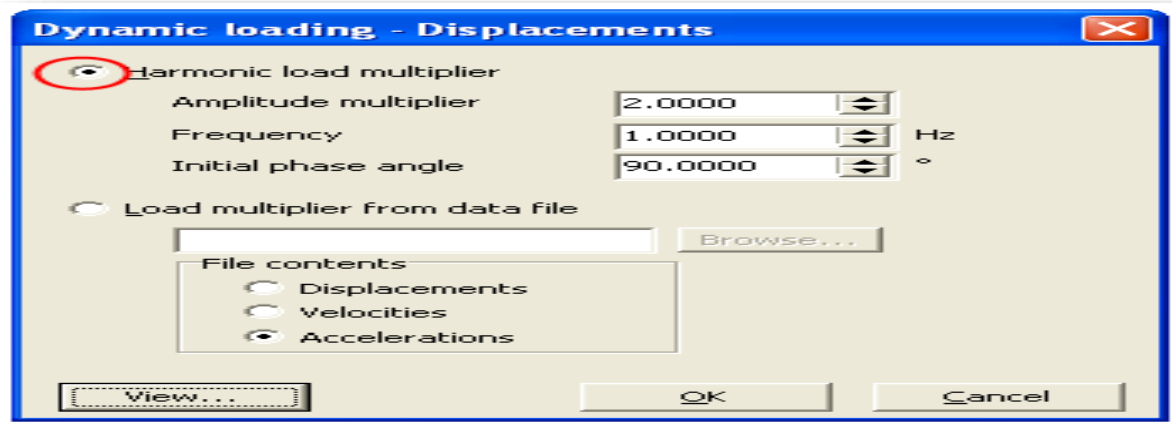


Fig .IV.11. Fenêtre de commande d'une excitation harmonique

❖ *A partir d'un chargement arbitraire*

Le code Plaxis nous donne la main de simuler n'importe quel séisme par l'utilisation du fichier SMC (Strong Motion CD-ROM), ce programme est utilisé par (U.S Geological Survey National Strong-motion Program) ; et il est possible de porter plus de 200 valeurs par seconde. Ce programme porte toutes les informations d'un séisme ou d'une vibration (la date, le site, la station, l'amplitude, la fréquence, la magnitude) (Fig.4.9 et Fig.4.10).

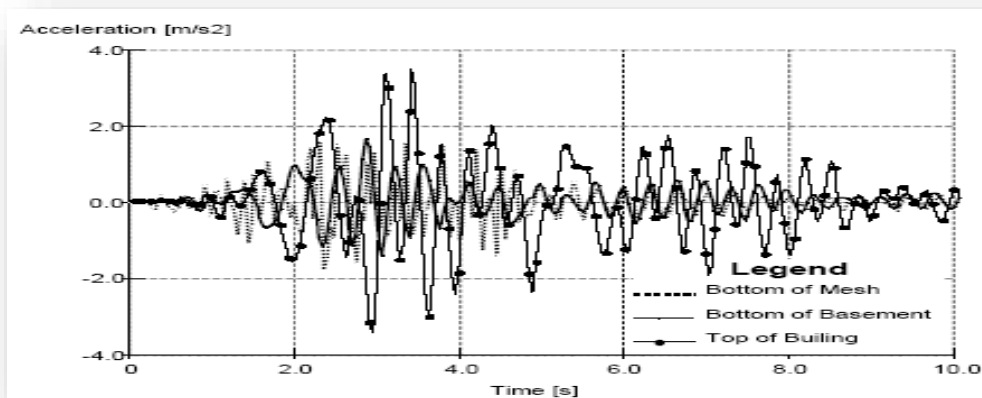


Fig .IV.12. Exemple d'un accélérogrammes arbitraire.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL-STRUCTURE

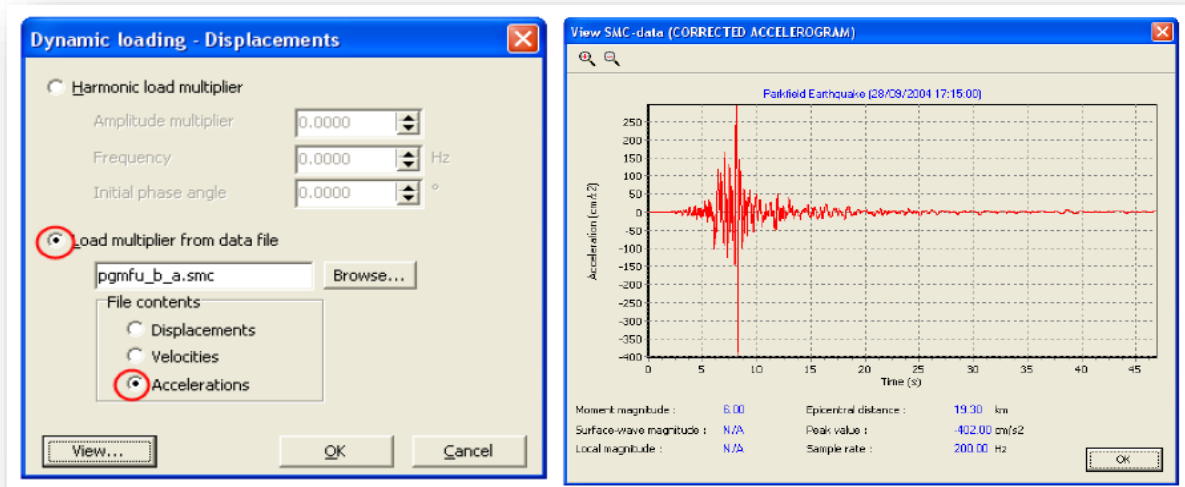


Fig. IV.13. Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogrammes (S.M.C).

❖ A partir d'un fichier ASCII

Ce dossier est un fichier ASCII qui peut être créé par l'utilisateur avec n'importe quel éditeur de texte. Dans chaque ligne par paires de valeurs (temps réel et multiplicateur correspondant dans deux colonnes) est défini, laissant au moins un espace entre elles. Le temps devrait augmenter dans chaque nouvelle ligne. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des intervalles de temps constants.

- quand on utilise [m] comme unité de longueur, on impose un déplacement à la frontière inférieure ($u_x=0.01\text{m}$ et $u_y=0.00\text{ m}$).

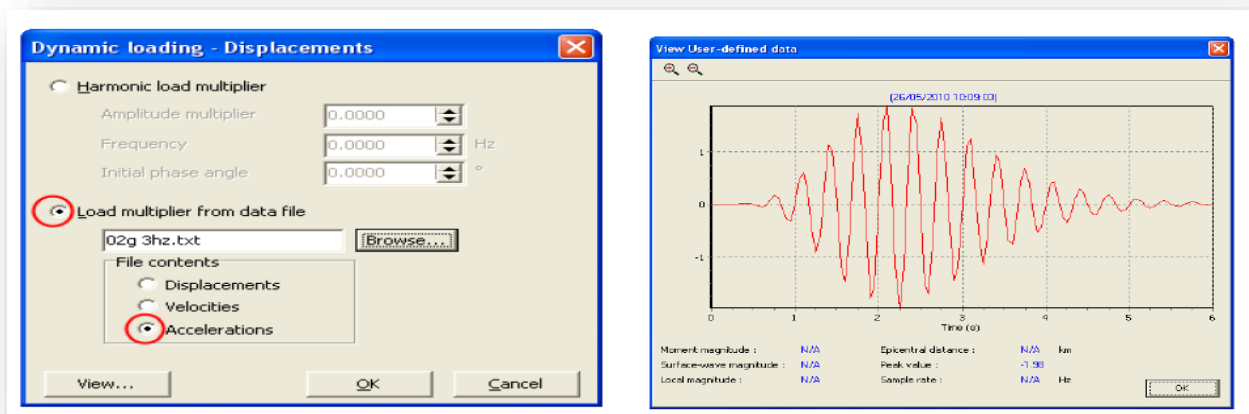


Fig. IV.14. Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogrammes ASCII.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.1.4. Paramètres de contrôle du calcul :

L'onglet *Paramètres* est employé pour définir les paramètres de contrôle d'une phase de calcul et de la procédure de résolution correspondante figure [4.8].

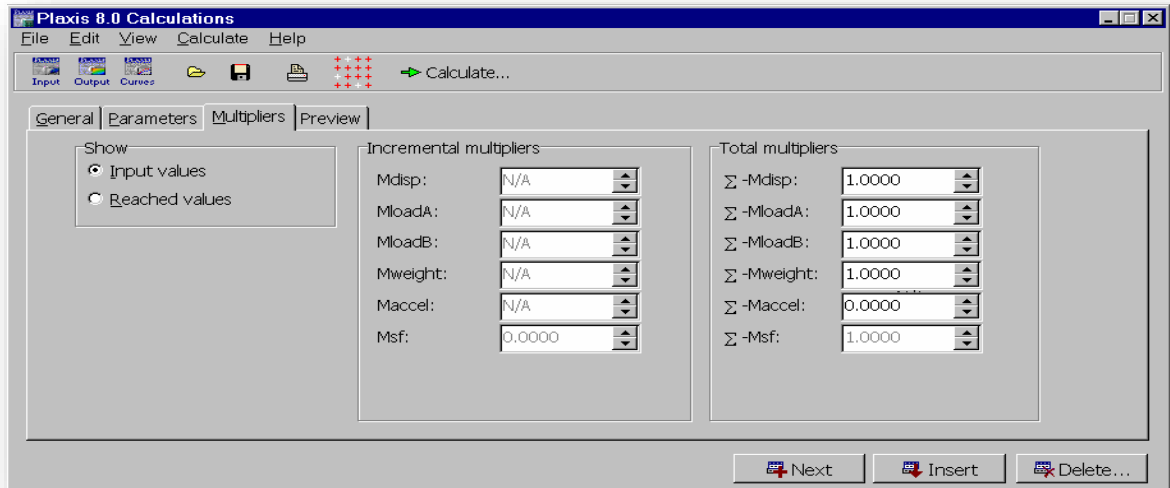


Figure.IV.15.Onglet *Paramètres* de la fenêtre de calcul (*Calculations*)

IV.1.4.1. Construction par étapes :

La construction par étapes (*Staged construction*) est le type de chargement (*Loading input*) le plus important. Grâce à cette fonctionnalité spéciale de Plaxis, il est possible d'échanger la géométrie et la configuration de chargement en désactivant ou réactivant les charges, les couches de sol ou les éléments de structure créés lors de la définition du modèle géométrique. La construction par étapes permet une simulation précise et réaliste de différents processus de chargement, construction et excavation. Cette option peut également être utilisée pour réassigner des jeux de caractéristiques des matériaux ou pour changer les distributions dépressions hydrauliques dans la géométrie. Pour mener un calcul de construction par étapes, il est d'abord nécessaire de créer un modèle géométrique qui inclut tous les objets utiles au calcul. Les objets qui ne sont pas nécessaires au début du calcul seront désactivés dans la configuration géométrique initiale à la fin du programme *Input*. L'analyse d'une construction par étapes peut être effectuée au cours d'un calcul plastique aussi bien que pour une analyse de consolidation. Dans l'onglet *Paramètres*, l'option *Staged construction* peut être sélectionnée dans la case *Loading input*.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

En double-cliquant sur le bouton *Define*, le programme *Input* est lancé et la fenêtre de construction par étapes apparaît.

Cette fenêtre est semblable à la fenêtre des conditions initiales, mis à part le fait que les options qui n'ont de sens que pour les conditions initiales (comme la *procédure K0*) ne peuvent être sélectionnées.

Il est aussi impossible d'accéder à la fenêtre géométrie du programme *Input* à partir de la fenêtre de construction par étapes. D'autre part, des options spécifiques au modèle construction par étape sont disponibles.

IV.1.4.2. Activation ou modification des chargements :

Les charges créées pendant la définition de la géométrie sont désactivées dans la situation initiale, mais elles peuvent être réactivées en utilisant un processus de construction par étapes. Comme pour les éléments de structure, les chargements peuvent être activés ou désactivés en cliquant une fois dessus dans le modèle géométrique.

Les charges actives sont dessinées dans leur couleur d'origine, alors que les charges désactivées sont dessinées en gris.

Lors de l'activation de charges, la valeur réelle du chargement appliqué durant le calcul est déterminée par la donnée du chargement et le multiplicateur de chargement correspondant.

IV.1.5. Exécution de la procédure de calcul :

Lorsque les phases de calcul ont été définies et les points pour les courbes sélectionnés, la procédure de calcul peut être exécutée. Avant de la lancer, il est cependant préférable de vérifier la liste des phases de calcul. En principe, toutes les phases de calcul signalées par une flèche bleue seront exécutées dans la procédure de calcul. Par défaut, si l'on définit une phase de calcul, celle-ci sera automatiquement sélectionnée pour

Les calculs. Une phase de calcul précédemment exécutée est marquée d'une coche verte si le calcul est parvenu à son terme, sinon elle est indiquée par une croix rouge.

Pour sélectionner ou désélectionner une phase de calcul à exécuter, il faudra soit double-cliquer sur la ligne correspondante, soit appuyer sur le bouton droit de la souris au niveau de la ligne correspondante puis sélectionner l'option *Mark calculate* ou l'option *Unmark calculate* dans le menu du curseur.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.1.6. Résultats affichés pendant les calculs :

Pendant une analyse en déformations par éléments finis, les informations à propos du processus itératif sont présentées dans une fenêtre séparée. Ces informations comprennent les valeurs courantes des facteurs multiplicateurs totaux de chargement ainsi que d'autres paramètres pour la phase en cours de calcul figure [4.9].

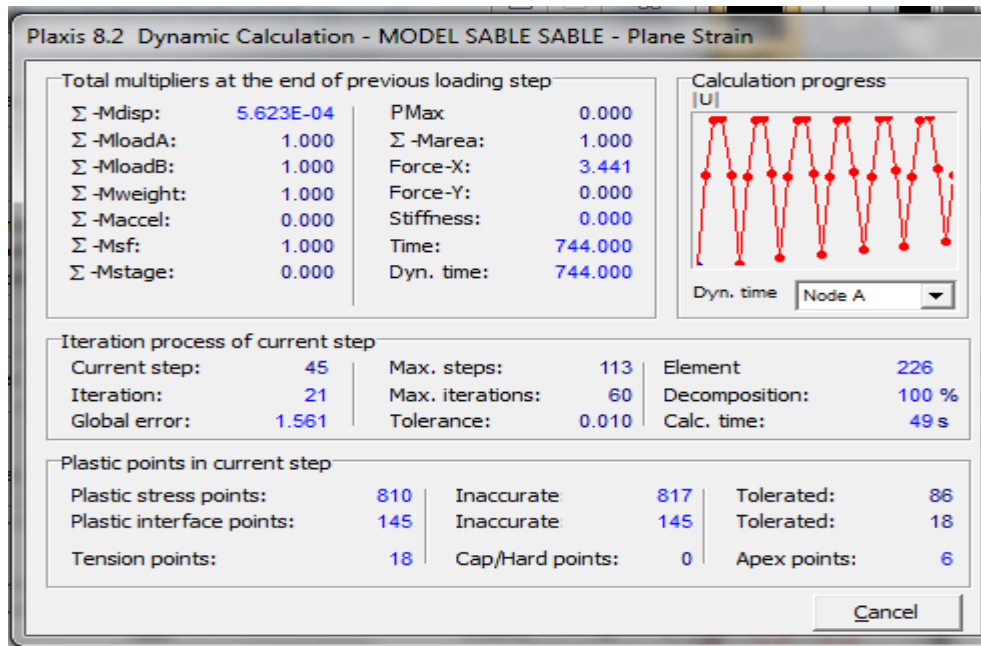


Figure .IV.16.Fenêtre de calcul.

IV.1.7. Le programme de résultats (output) :

Cette icône représente le programme de résultats (*Output*). Celui-ci contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis. Au lancement du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul approprié ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. Après cette sélection, une première fenêtre de résultats est ouverte ; celle-ci affiche le maillage déformé.

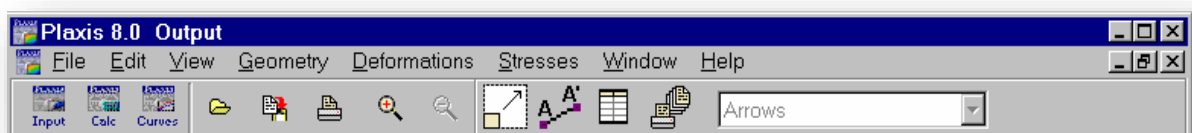


Figure. IV .17. Barre d'outils de la fenêtre principale du programme *Output*.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.1.8. Le menu des résultats :

Le menu principal du programme *Output* contient des menus déroulants qui couvrent la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, et voir des graphiques et des tableaux. Les principaux types de résultats d'un calcul aux éléments finis sont les contraintes et les déformations. Par conséquent, ces deux aspects constituent la majeure partie du menu des résultats. Lorsqu'un modèle géométrique complet est affiché, le menu principal est constitué de différents menus: *File*, *Edit*, *View*, *Geometry*, *Deformations*, *Stresses*, *Window* et *Help*.

Selon le type de données présentées dans une forme de résultats, le menu changera.

IV.1.9. Le programme courbe (curves) :

Cette icône représente le programme *Curves*. Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations. Au début du programme *Curves*, il faut choisir entre ouvrir une courbe existante et en créer une nouvelle. Si *New chart* est sélectionné, la fenêtre *Curve generation* apparaît, dans laquelle les paramètres de génération de courbes sont réglés.

En sélectionnant *Existing chart*, la fenêtre de sélection permet un choix rapide de l'une des quatre courbes les plus récentes. Si le graphique à sélectionner n'apparaît pas dans la liste, l'option <<<More files>>> peut être utilisée.

Le gestionnaire de fichiers général apparaît alors, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires disponibles et de choisir le fichier graphique de PLAXIS souhaité (*.G## où ## est un numéro compris entre 00 et 99). Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la fenêtre principale.

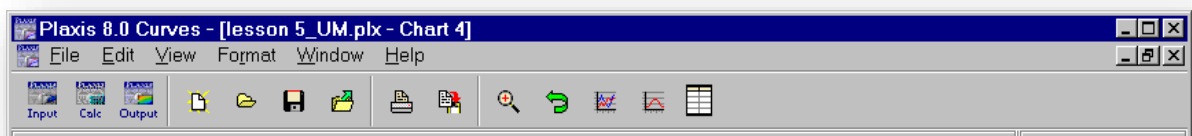


Figure. IV. 18.Barre d'outils de la fenêtre principale du programme *Curves*

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

2^{ème} PARTIE :

IV2.ÉTABLISSEMENT D'UN MODELE GÉOMÉTRIQUE :

IV.2.1. Introduction :

Dans cette section, nous présentons l'utilisation du *PLAXIS* pour la simulation des essais réalisés avec du sable des dunes(Boussaâda).

Les paramètres du modèle ont été déterminés d'après la méthodologie présentée dans la partie précédente.

Le but de cette partie est de déterminer un modèle géotechnique, dit de référence, donc on va modéliser la boîte de cisaillement,

Le modèle de référence a été établi et calculé avec le logiciel *PLAXIS*. Il sera utilisé comme base de comparaison lors de l'étude paramétrique qui suivra.

IV.2.2. Définition des données :

Pour que le logiciel *PLAXIS* puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données du modèle suivantes :

On choisit un nom (essai de cisaillement), en déformation plane avec triangles à 15 nœuds. On suppose une couche de sol de 0.03m d'épaisseur et de 0.06m de large (*les dimensions de la boîte de casagrande*). On obtient donc un rectangle de 30x60mm², cette couche est divisée en deux couches de 0.015m d'épaisseur (*demi-boîte inférieure et supérieure*), de même nature de sol dans le cas d'essais sol-sol.

Mais dans le cas d'essais sol-structure on remplace la couche inférieure par l'élément de structure.

Les conditions aux limites sont prises par défaut : déplacements libres sur les deux cotés verticaux et bloqués au fond.

On choisit le chargement *A (load system A)* et on applique pour le sable les chargements (100KPa), On choisit aussi Les déplacements imposés (*Prescribed displacements*)

Finalement on choisit l'élément d'interface (*interface*), les figures suivantes figure [IV.12.1 et IV.12.2] représentent la géométrie du problème.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

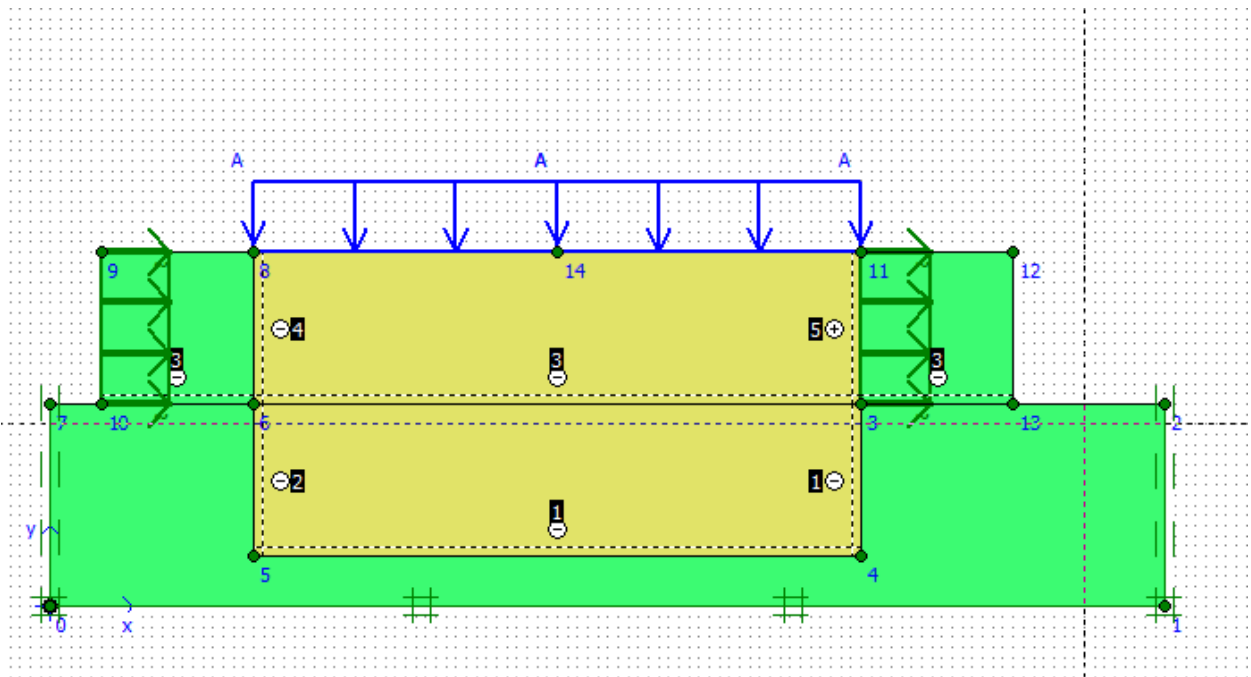


Figure. IV.12.1. *Modèle géométrique du problème (essai sol-sol)*

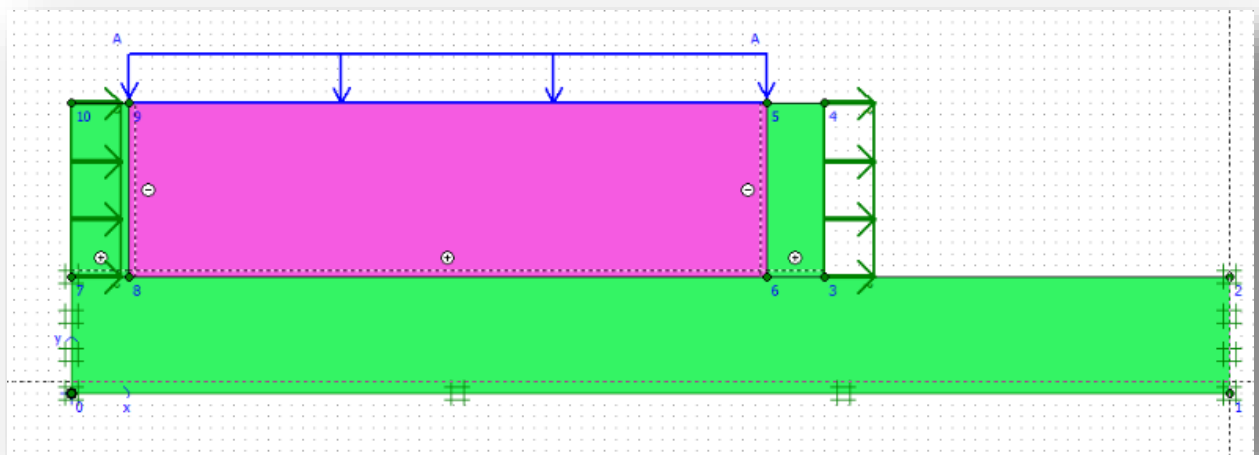


Figure. IV.12.2. *Modèle géométrique du problème (essai sol-structure)*

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.2.2.1. Paramètres de sol et de l'interface:

On définit un nouveau type de sol en choisissant (*new*) dans la base de données des matériaux.

On utilisera un modèle de Mohr-Coulomb et on précisera que le sol est drainé (*drained*).

- Les paramètres du sol et de l'interface pour les essais sol-sol sont donnés dans le tableau {4.1}.

- Les paramètres du sol et de l'interface pour les essais sol-structure (surface lisse) sont donnés dans le tableau {4.2.1}.

- Les paramètres du sol et de l'interface pour les essais sol-structure (surface rugueuse) sont donnés dans le tableau {4.2.2}.

- Les paramètres de la structure sont donnés dans le tableau {4.3}.

Parameters	Nom	Sable lâche	Sable dense	Unite
Modèle type	<i>Model</i>	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	13.4	16.6	kN/m ³
Poids volumique humide	γ_{sat}	20	20	kN/m ³
Perméabilité horizontale	K_x	0.001	0.001	m/jour
Perméabilité verticale	K_y	0.001	0.001	m/jour
Module d'Young	E_{ref}	41000	51000	kN/m ²
Coefficient de Poisson	ν	0.3	0.3	-
Cohésion	c_{ref}	0.19	1	kN/m ²
Angle de frottement	ϕ	39.23	42.93	°
Angle de dilatation	ψ	9.23	12.93	°
Facteur de rigidité de l'interface	R_{inter}	0.9	0.90	-

Tableau. IV.1. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-sol

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Parameters	Nom	Sable lâche	Sable dense	Unite
Modèle type	<i>Model</i>	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	13.4	16.6	kN/m ³
Poids volumique humide	γ_{sat}	20	20	kN/m ³
Perméabilité horizontale	K_x	0.001	0.001	m/jour
Perméabilité verticale	K_y	0.001	0.001	m/jour
Module d'Young	E_{ref}	41000	51000	kN/m ²
Coefficient de Poisson	ν	0.3	0.3	-
Cohésion	c_{ref}	2.19	4.64	kN/m ³
Angle de frottement	φ	27.56	30.88	°
Angle de dilatation	ψ	0	0.88	°
Facteur de rigidité de l'interface	R_{inter}	0.6	0.7	-

Tableau. IV.2.1. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-structure surface lisse

Paramètres	Nom	Sable lâche	Sable dense	Unité
Modèle type	<i>Model</i>	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	13.4	16.6	kN/m ³
Poids volumique humide	γ_{sat}	20	20	kN/m ³
Perméabilité horizontale	K_x	0.001	0.001	m/jour
Perméabilité verticale	K_y	0.001	0.001	m/jour
Module d'Young	E_{ref}	41000	51000	kN/m ²
Coefficient de Poisson	ν	0.3	0.3	-
Cohésion	c_{ref}	14.17	15.35	kN/m ³
Angle de frottement	φ	38.33	40.39	°
Angle de dilatation	ψ	8.33	10.39	°
Facteur de rigidité de l'interface	R_{inter}	rigide	rigide	-

Tableau. IV.2.2. Propriétés de sols et d'interfaces pour les essais sol-structure surface rugueuse

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

Paramètre	Nom	structure	Unité
Type de comportement	<i>MODEL</i>	Linéaire Elastique	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	60	kN/m
Module d'Young	E_{ref}	2,1E7	kNm ² /m
Coefficient de Poisson	ν	0.15	-

Tableau. IV.3. propriétés de la structure.

IV.2.2.2. Génération du maillage :

a) Cas d'essai sol-sol :

Le modèle de référence se fait par des éléments à 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de 540 éléments et le nombre des nœuds est de 4662 nœuds.

On règle la finesse du maillage (*global Coarseness*) sur « *medium* », puis, on le raffine localement au niveau de l'interface, comme indiqué sur la figure [4.13.1].

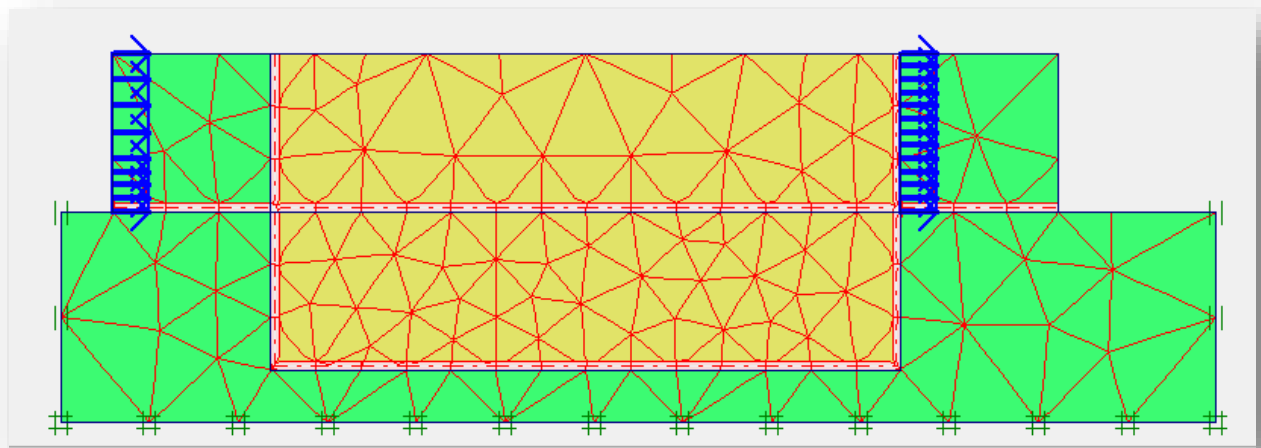


Figure .IV.13.1. Maillage du problème (essai sol-sol).

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

b) Cas d'essai sol-structure :

Le modèle de référence se fait par des éléments à 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de 504 éléments et le nombre des nœuds est de 4590 nœuds.

On règle la finesse du maillage (*global Coarseness*) sur « *medium* », puis, on le raffine localement au niveau d'élément structure, comme indiqué sur la figure [4.13.2].

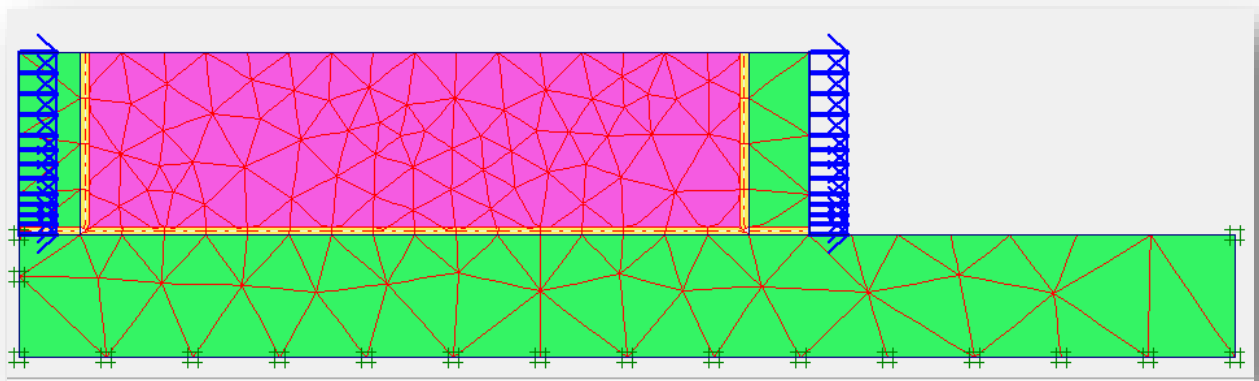


Figure .IV.13.2. Maillage du problème (essai sol-structure).

IV.2.3.Procédure de calculs :

Le calcul du modèle de référence se fait défini en 2 phases :

Phase 0 : initiation des contraintes (procédure *K0*) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

Phase 01 : phase de chargement :

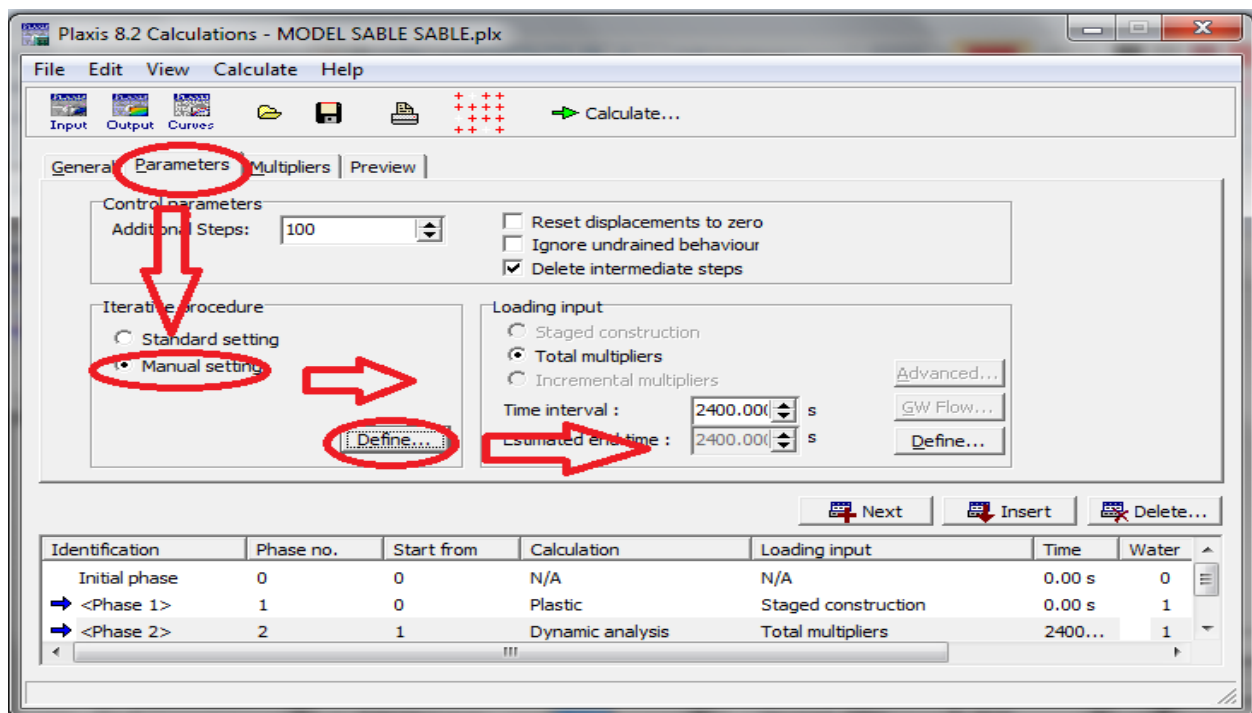
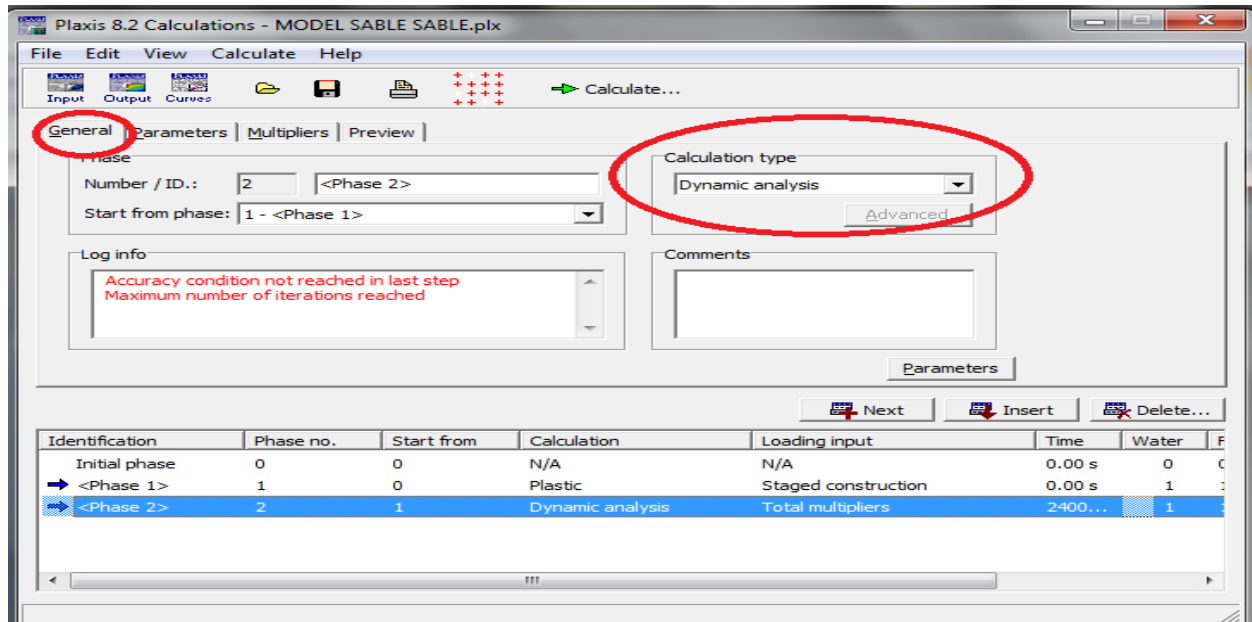
Dans la fenêtre calcul, on choisit pour la première phase les options et dans l'onglet *Paramètres*, on prend l'option «construction par étapes» (*staged construction*) et l'option «Remise à zéro des déplacements » (*reset displacements to zero*) puis on clique sur le bouton *Define*.

On obtient alors une vue de modèle avec en grisé les charges que l'on va activer en cliquant dessus et régler les valeurs de la charge, puis on active l'interface dans le cas d'essai sol-sol.

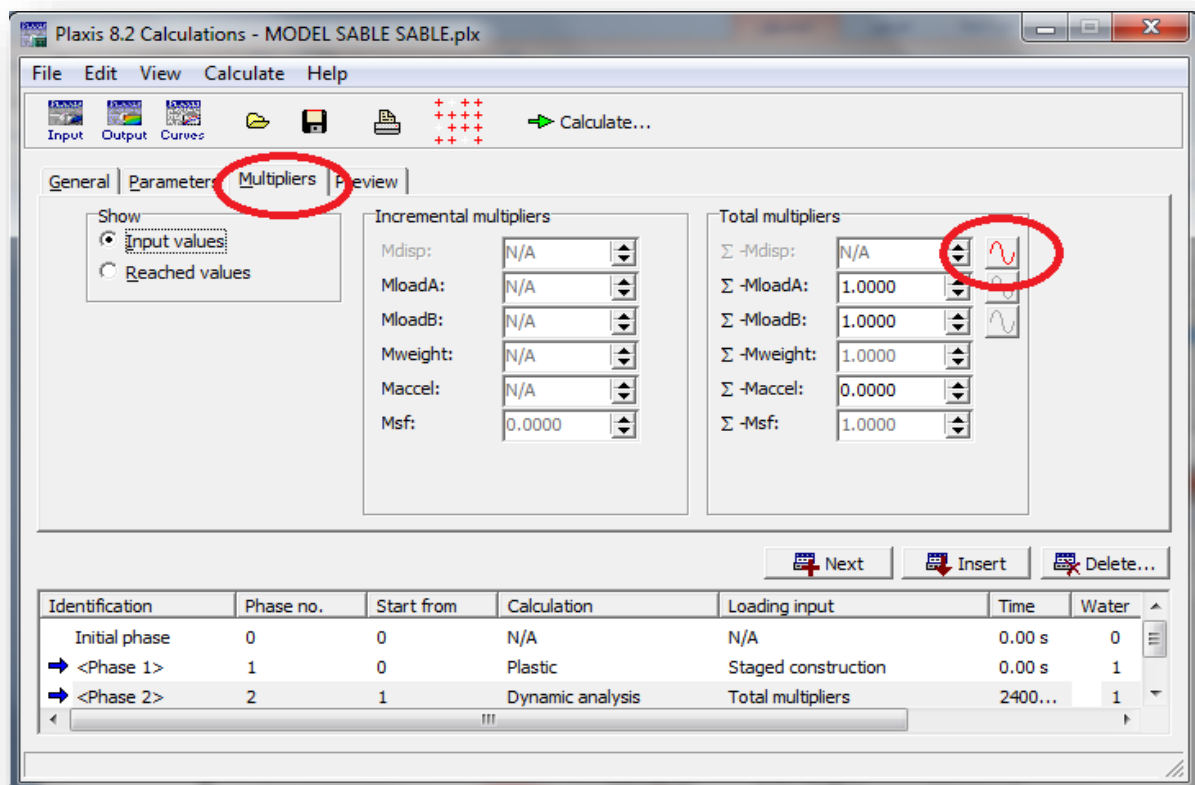
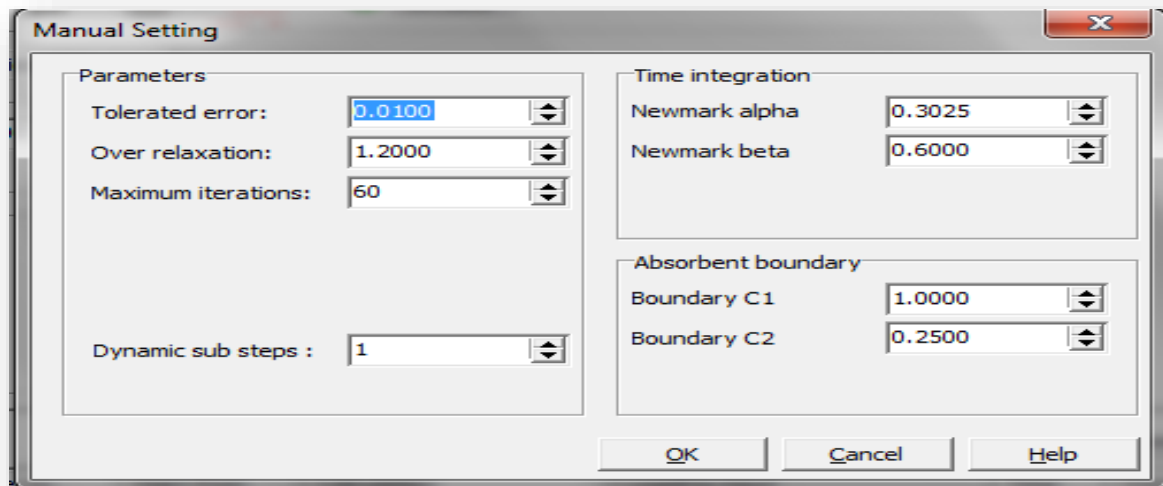
Dans le cas d'essais sol-structure on active la charge et l'élément structure et l'interface.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

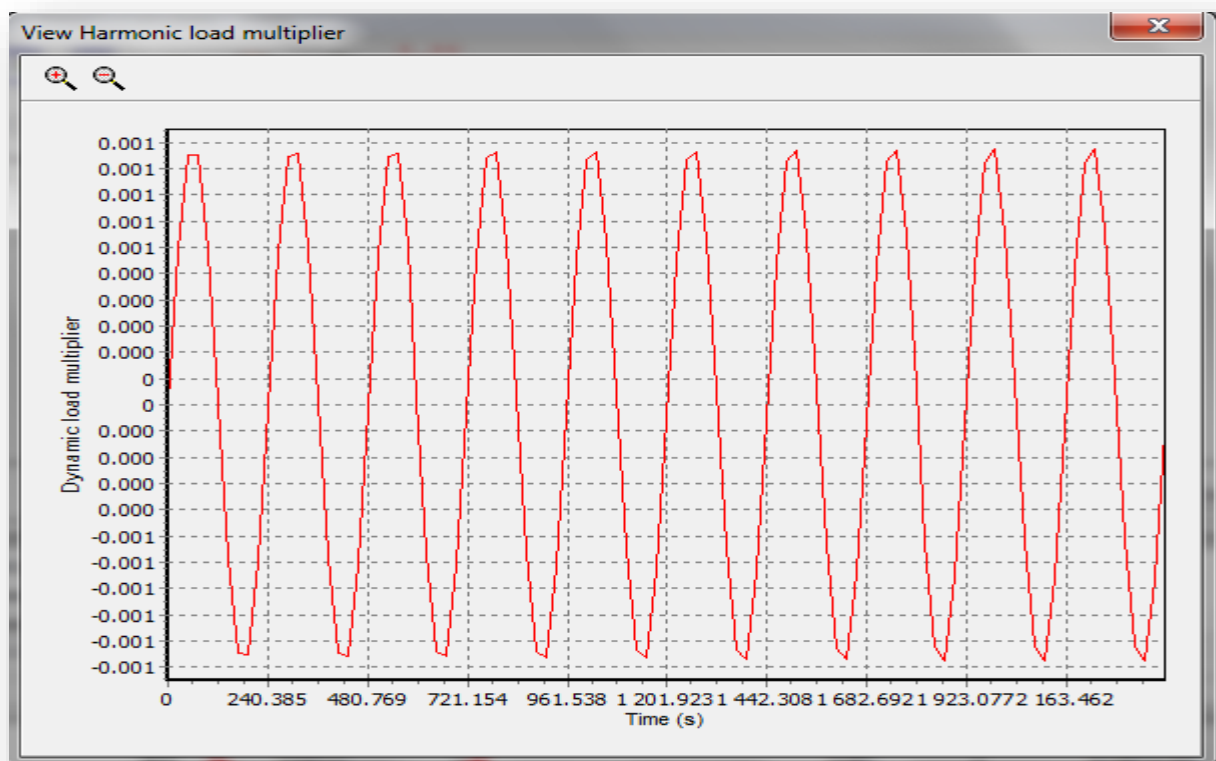
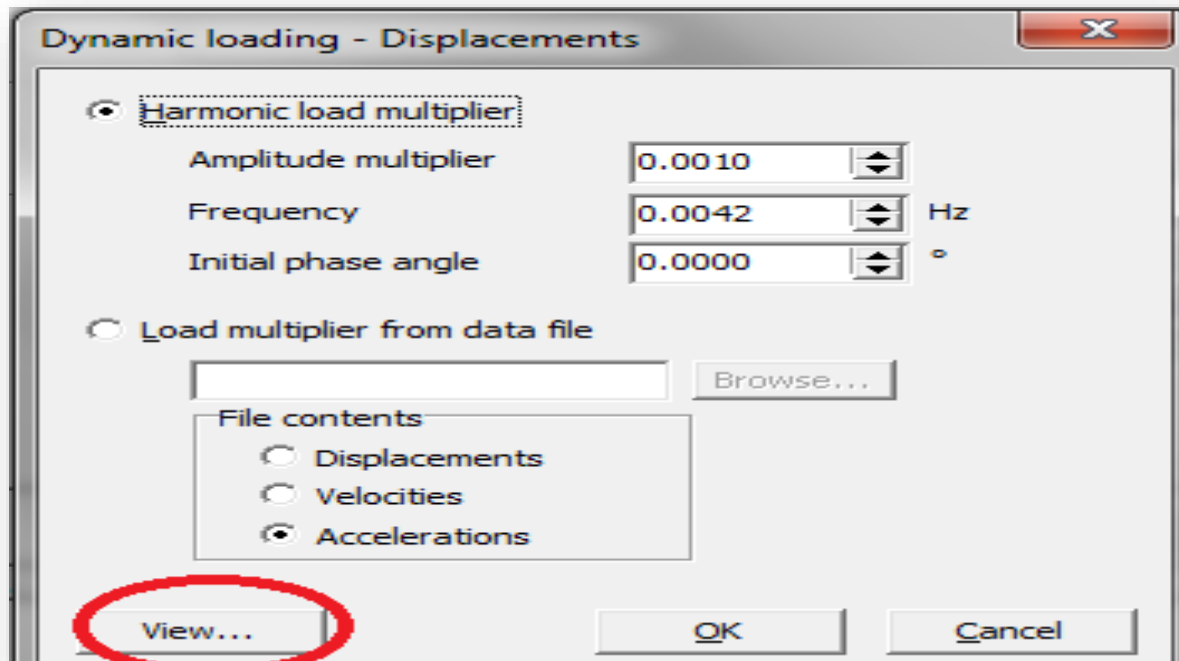
Phase 02 : phase de cisaillement : dans l'onglet (General) on choisi (calculation type),(Dynamique analysis)



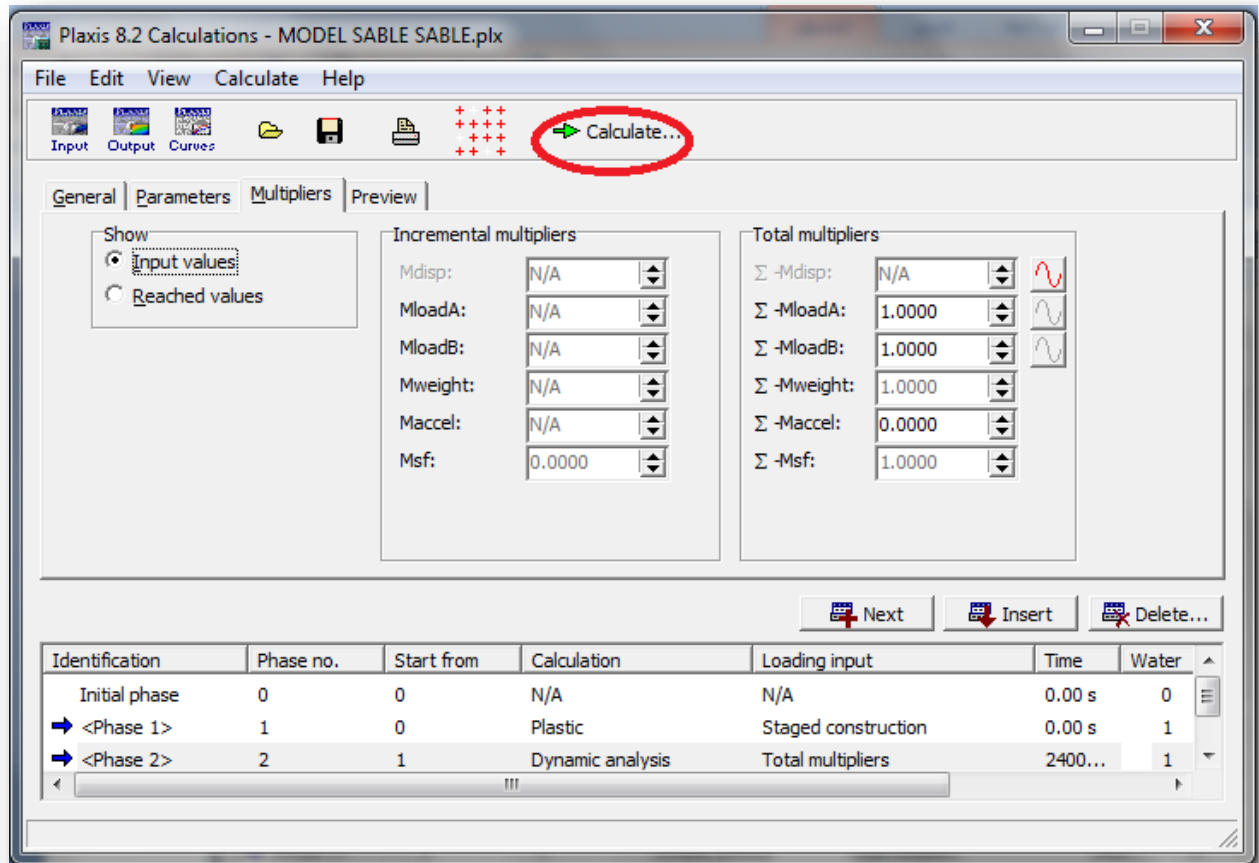
MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



Il est nécessaire de choisir les points où l'on veut visualiser les données, tant en déplacement (des nœuds) qu'en contraintes (des points de Gauss).

On peut alors lancer le calcul...

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.2.4.Les principaux résultats :

On s'intéresse à:

- ❖ La déformation de maillage
- ❖ Les points plastiques (*plastic points*)
- ❖ Effet du paramètre du sol (analyse paramétrique)
- ❖ La variation de la force (F_x) en fonction du déplacement horizontal (w)
- ❖ La variation du déplacement a la normal en fonction du déplacement horizontal (w)
- ❖ La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte de confinement pour déterminer les caractéristiques de cisaillement (c , ϕ) et on le comparé avec les résultats obtenu dans les essais réalisés.

IV.2.4.1.Déformation de maillage :

La déformation de maillage est représentée sur les figures suivantes selon le mode d'essai.

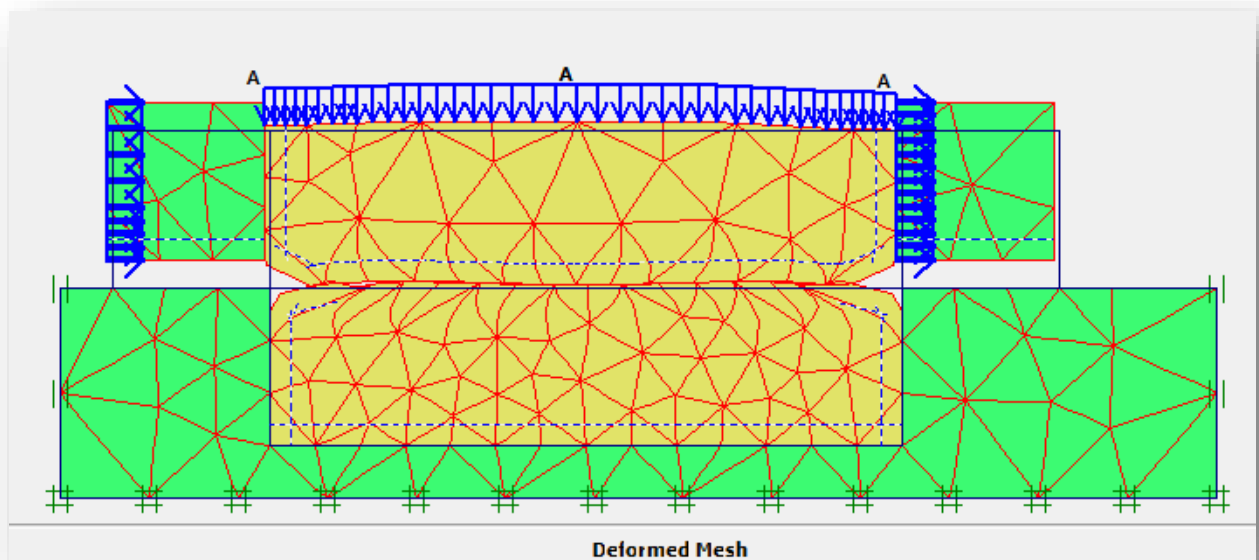


Figure .IV.14.1.Déformation du Maillage (essai sol-sol).

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

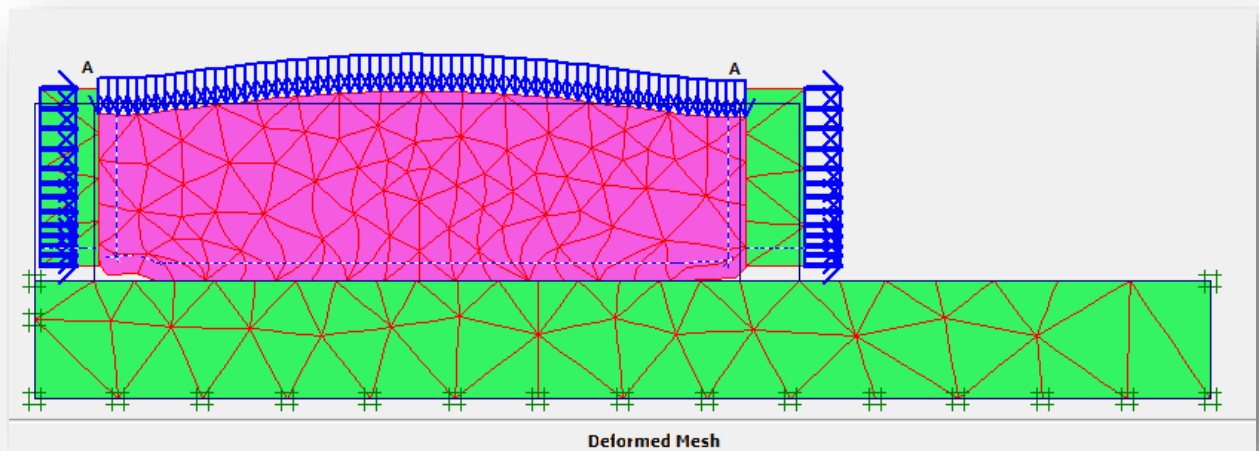


Figure .IV.14.2.Déformation du Maillage (essai sol-structure).

IV.2.4.2.Les points plastique : Les points plastiques (*Plastic points*) sont les points de contrainte dans un état plastique,

Les figures suivantes représentent les points plastiques dans le modèle selon le mode d'essais :

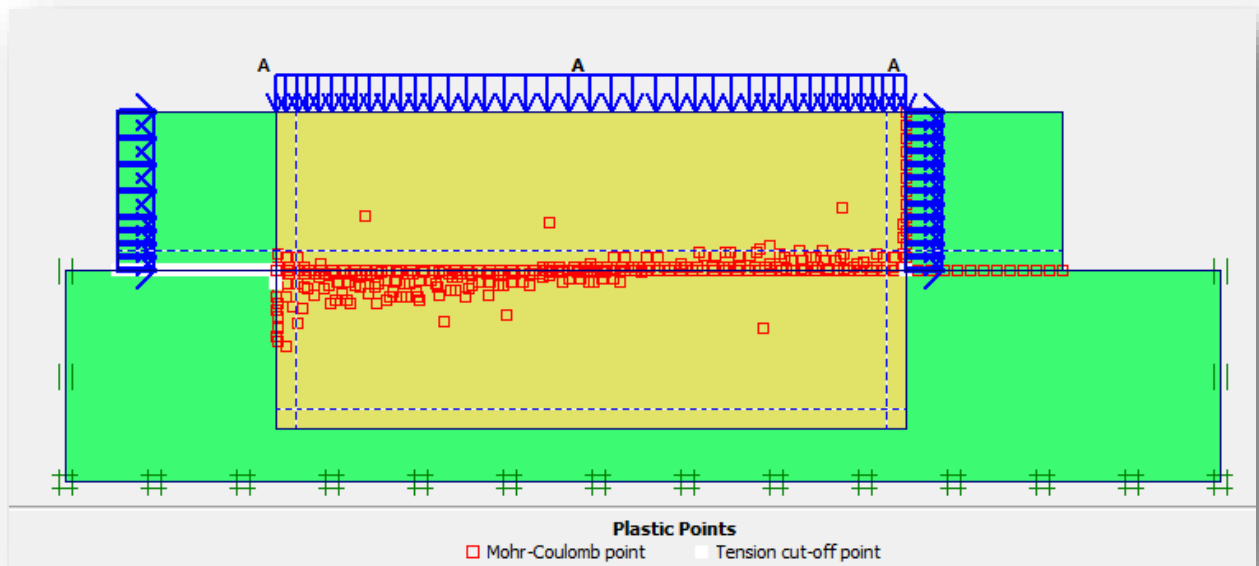


Figure .IV.15.1.les points plastique (essai sol-sol)

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

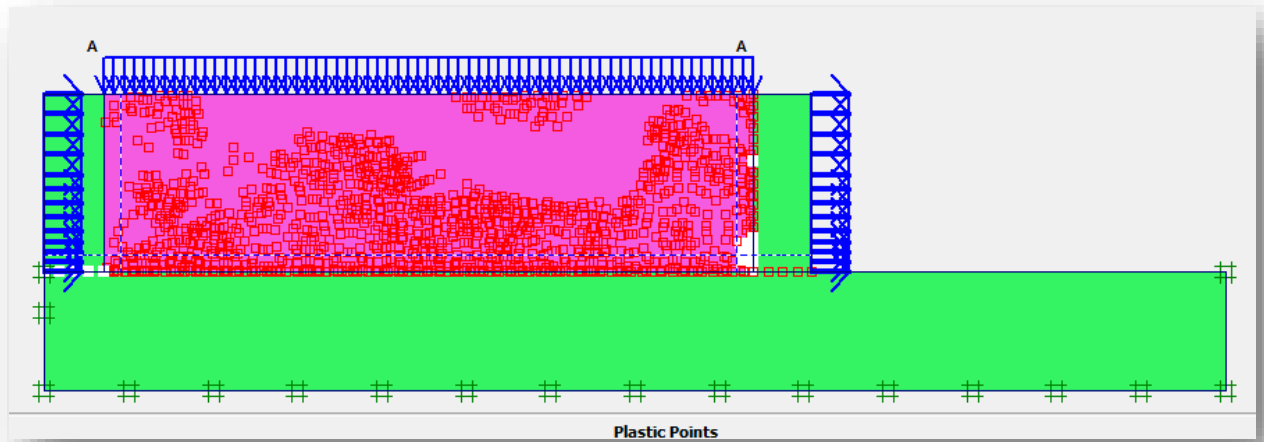


Figure .IV.15.2.les points plastique (essai sol-structure)

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.2.4.3.Simulation des essais d'interface :

Cette partie a pour objet de valider le modèle Mohr-coulomb à partir des données expérimentales acquises sur le sable de dune (Boussaada,wilaya de M'sila) au moyen d'essais de cisaillement direct. On décrit, pour ce modèle, d'abord l'approche expérimentale suivie dans la détermination de leurs paramètres, On présente et discute ensuite les principaux résultats de Simulation des essais d'interface effectuée à l'aide du code PLAXIS pour le modèle considéré.

IV.2.4.3.1.surface sable-sable :

❖ *Sable lâche:*

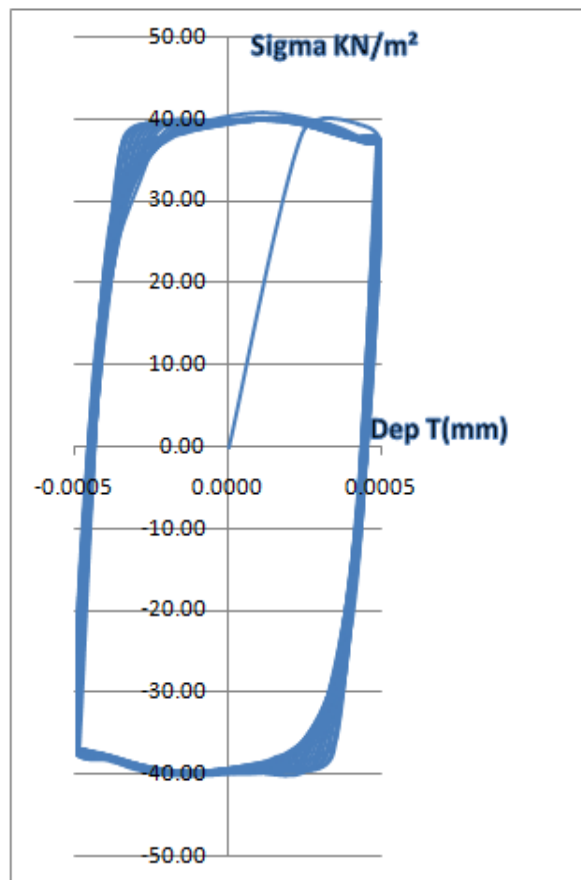
Les figures IV.21a et IV.21b montrent la simulation des essais utilisés pour déterminer les paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que le modèle ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal

❖ *Sable dense :*

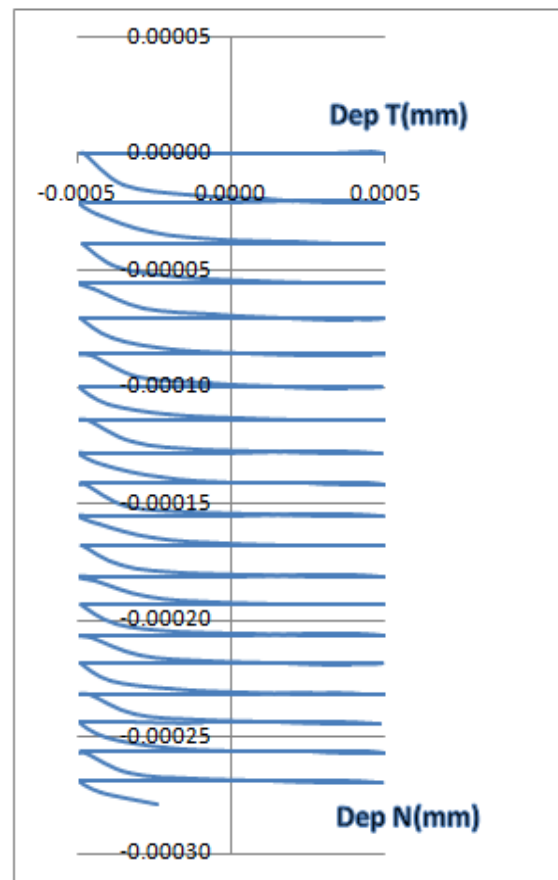
Les figures IV.22a et IV.22b montrent les résultats de simulation des trois essais à contrainte normale constante.

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,on constate que le modèle ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



a



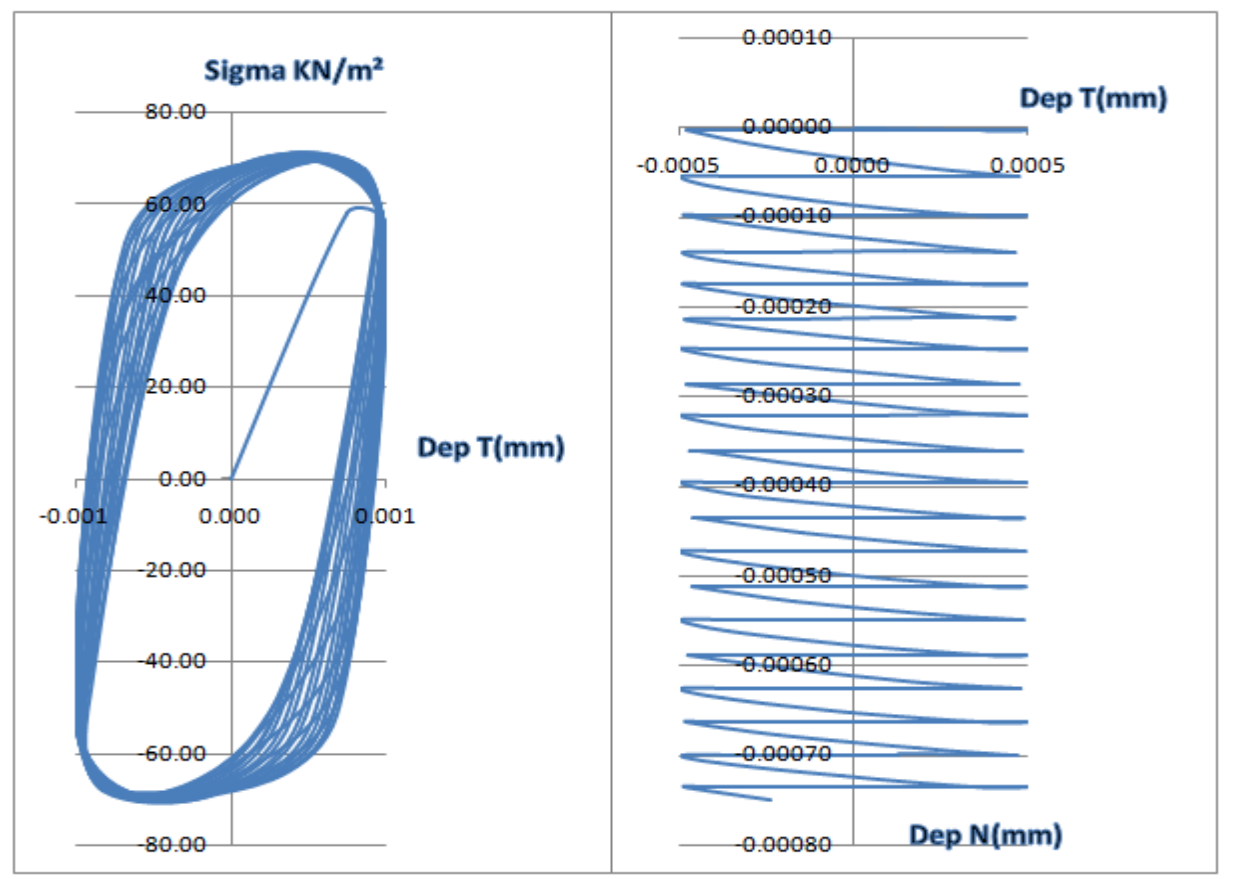
b

**Figure .IV.21. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable
amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 20 CYCLE**

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



a

b

Figure .IV.22. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable
amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 20 CYCLE

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

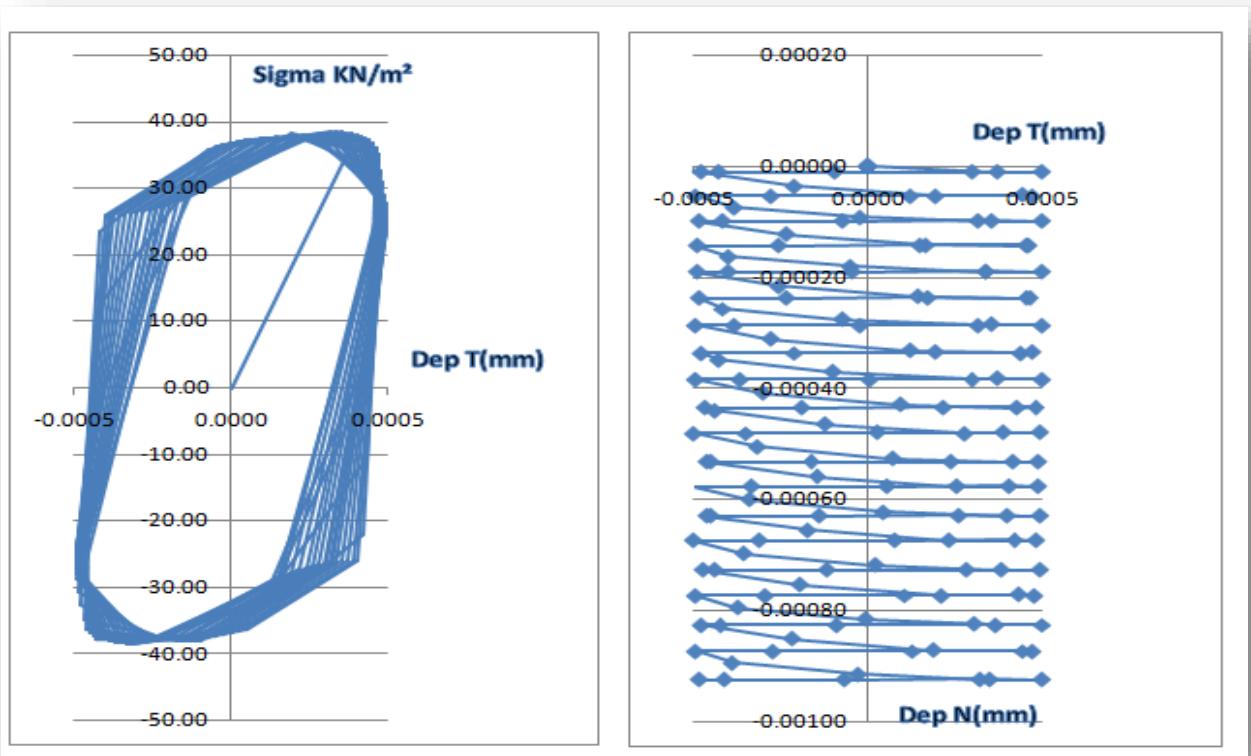
IV.2.4.3.2.surface Acier lisse:

❖ *Sable lâche :*

Les figures IV.23a et IV.23b 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 ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal

❖ *Sable dense :*

Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures IV.24a et IV.24b). On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement, pour le déplacement normal, on constate que le modèle ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal



a

b

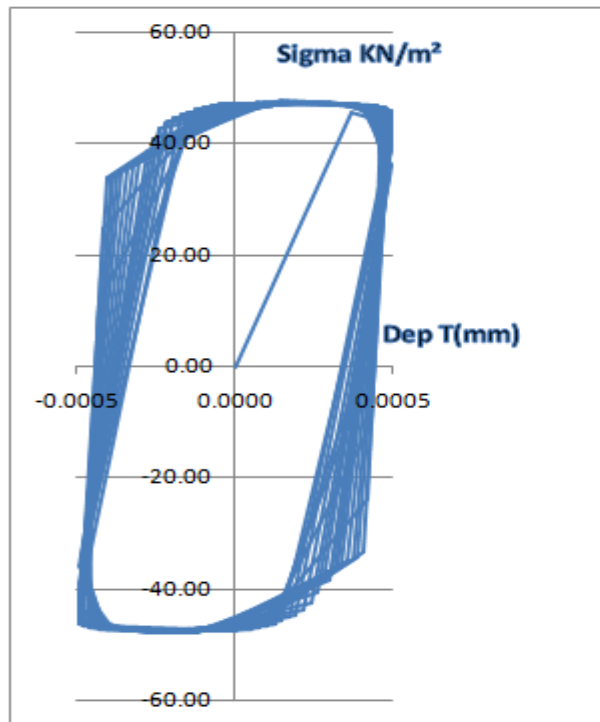
Figure .IV.23. Simulation des essais à contrainte normale constante surface (Acier lisse)

amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 20 CYCLE

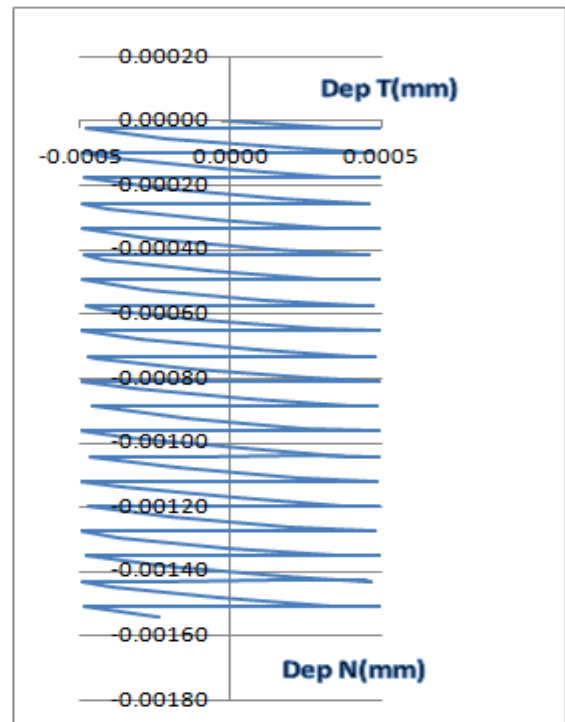
a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



a



b

Figure .IV.24. Simulation des essais à contrainte normale constante surface (Acier lisse)

amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 20 CYCLE

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

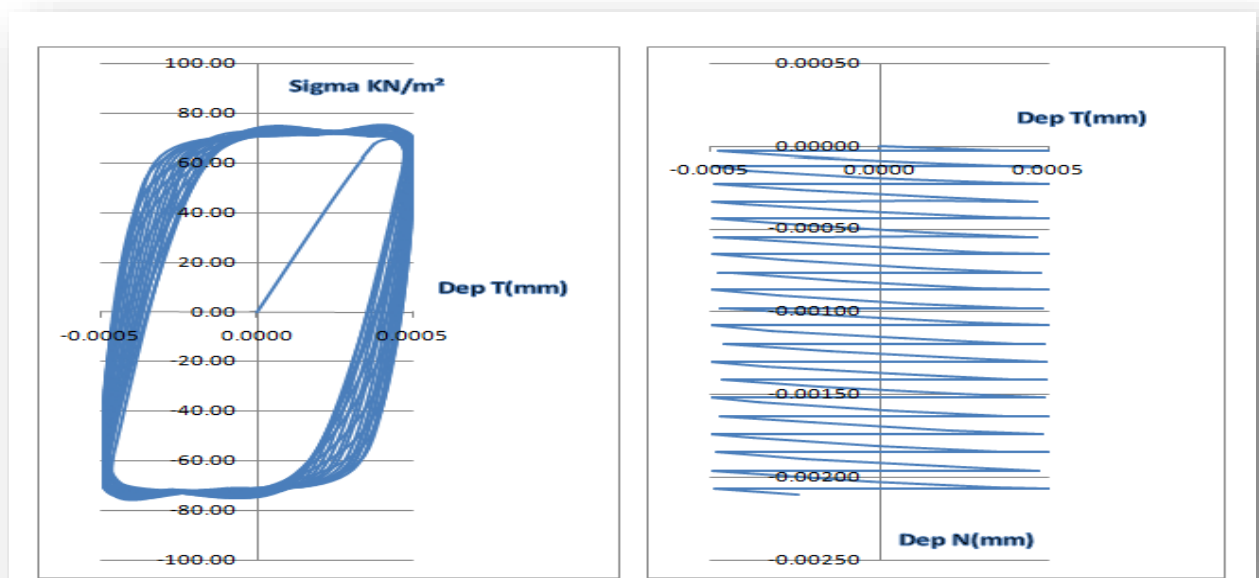
IV.2.4.3.3.surface Acier rugueuse:

❖ *Sable lâche :*

Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures IV.25a et IV.25b). 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 ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal.

❖ *Sable dense :*

Les figures IV.26 a et IV.26b montrent les résultats de simulation d'essai 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, on constate que le modèle ne reproduit pas bien l'évolution du déplacement normal



a

b

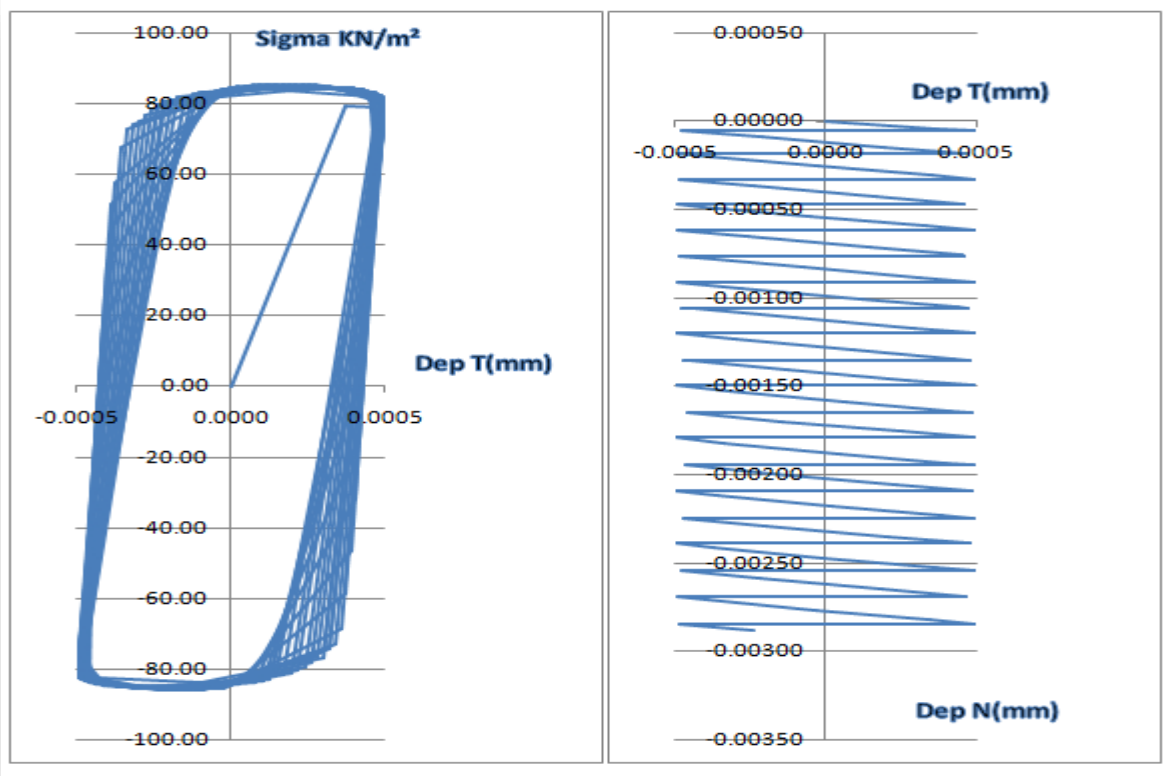
Figure .IV.25. Simulation des essais à contrainte normale constante surface (Acier rugueuse)

amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 20 CYCLE

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE



a

b

Figure .IV.26. Simulation des essais à contrainte normale constante surface (Acier rugueuse)

amplitude $-0.5 \leq \lambda \leq 0.5$, Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 20 CYCLE

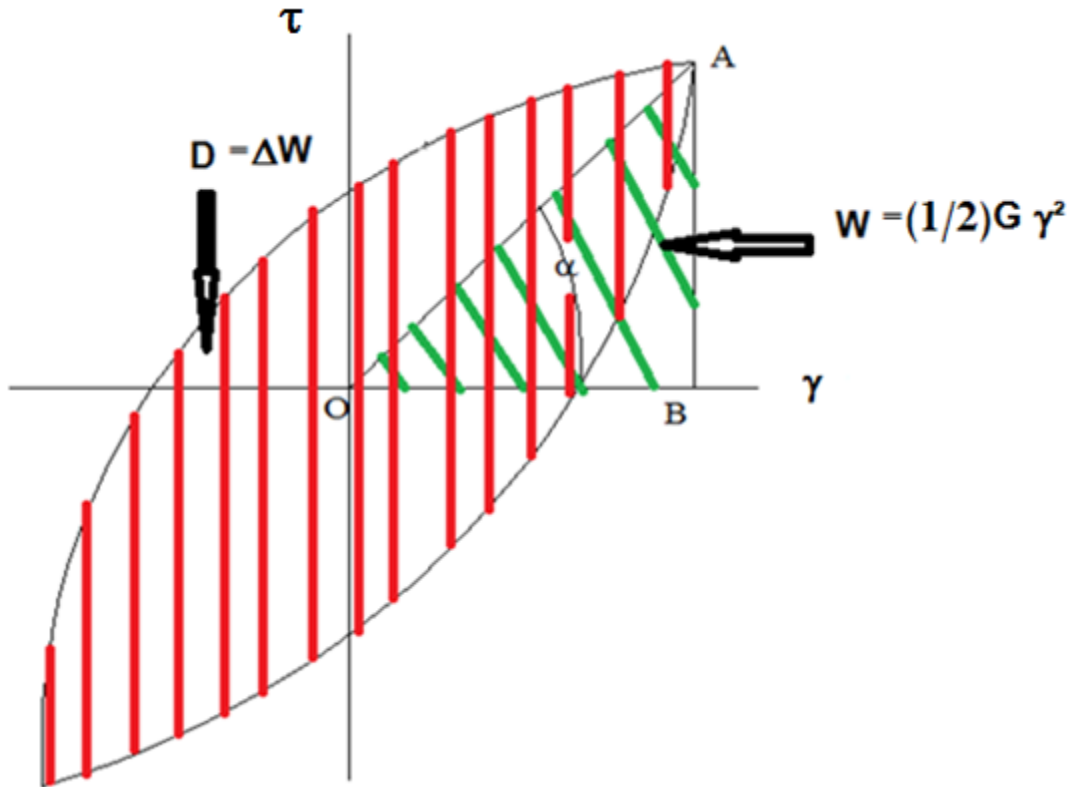
a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

IV.2.4.4.Caractéristiques de la comportement cyclique :

Dans se partie on à définie les deux paramètre β, G et η ou β c'est la coefficient d'amortissement, et G c'est le module de cisaillement, et η c'est le coefficient de perte



$$\beta = \left(\frac{1 * (\text{aire de la boucle})}{4\pi * (\text{aire OAB})} \right)$$

$$G = t g \alpha$$

$$\eta = (\Delta W) / (2\pi * W)$$

$$\gamma = \Delta u / \Delta h$$

Ou γ c'est la distorsion

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

A_ Essai sable sable :

Les paramètres du modèle ont été déterminés à partir des essais cycliques réalisés à contrainte normale constante, pour les différentes densités et rugosités. Nous allons décrire la reproduction des essais de calage, et après Le tableau IV.1 récapitule les valeurs des paramètres trouvées.

✓ Sable lâche:

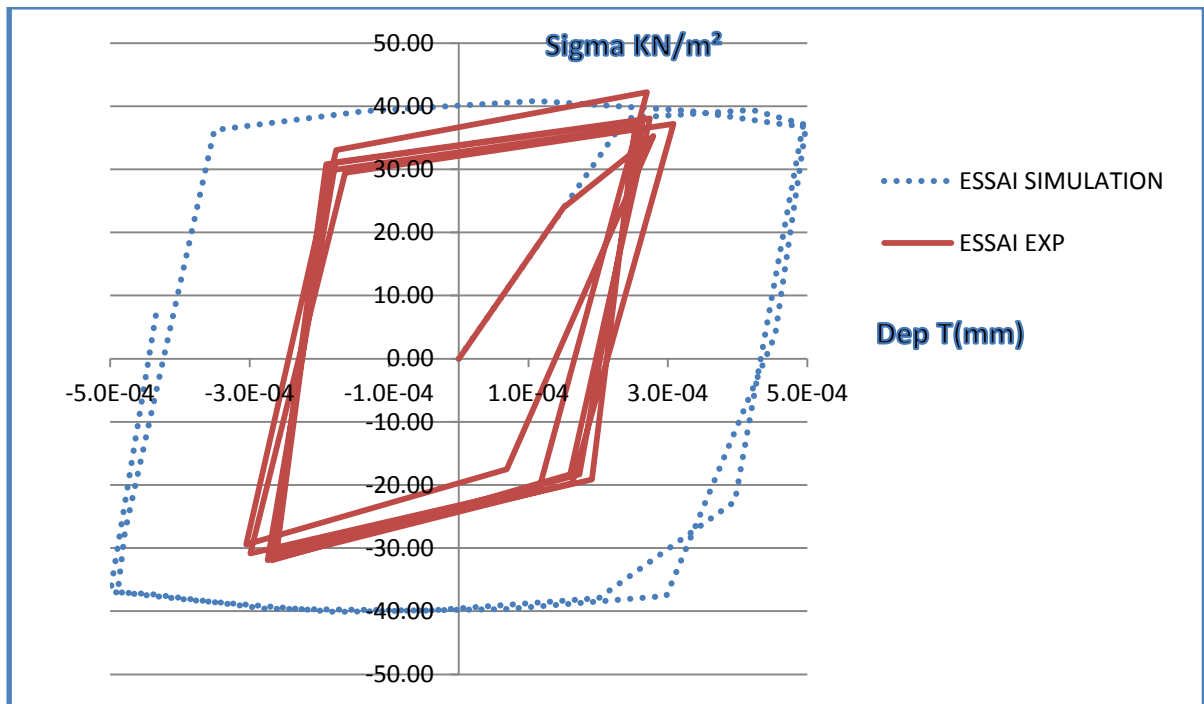


Figure .IV.27. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable

Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 20 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

✓ *Sable dense:*

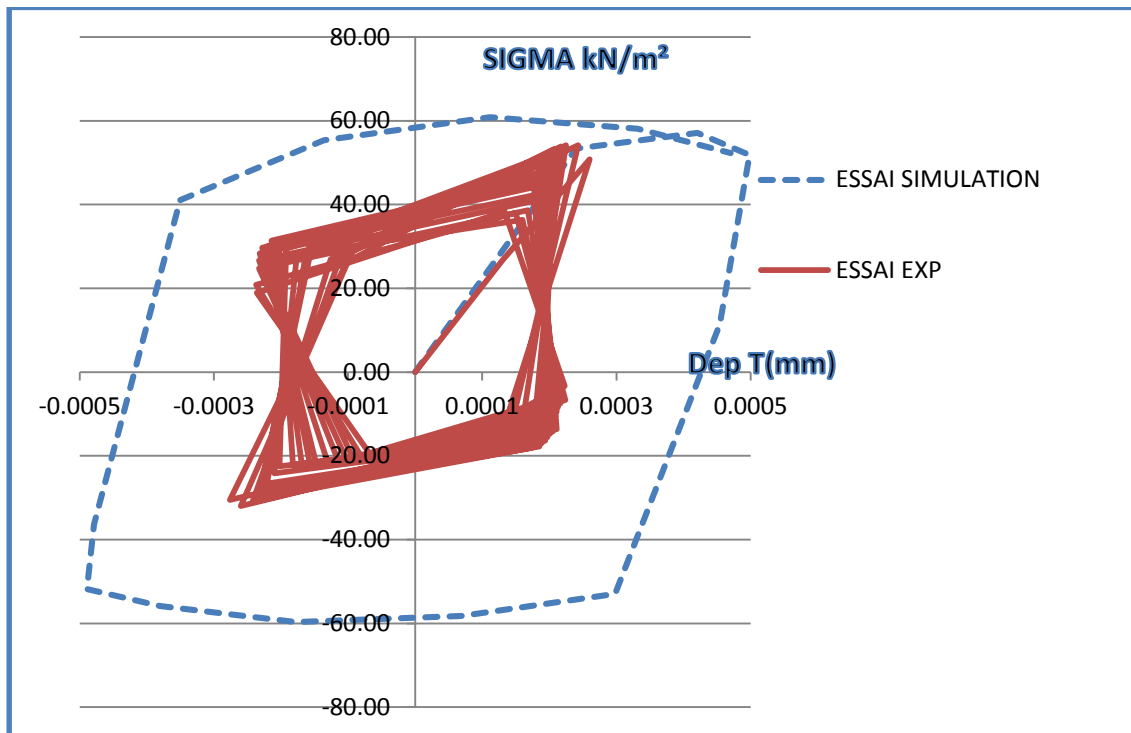


Figure .IV.28. Simulation des essais à contrainte normale constante surface sable-sable

Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 20 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

			β	G	η
ESSAI Sable_Sable	expérimentale	Sable lâche	0.390	2.47	0.78
		Sable dense	0.383	3.48	0.766
	numérique	Sable lâche	0.343	2.14	0.686
		Sable dense	0.364	2.35	0.728

Tableau.IV.4.les paramètre β , G et η dans l'essai sol_sol

Dans ce tableau, on observe que les résultats obtenus expérimentalement sont plus élevés que les résultats obtenus numériquement,

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

B_ surface sable_structure :

Les paramètres du modèle ont été déterminés à partir des essais cycliques réalisés à contrainte normale constante, pour les différentes densités et rugosités. Nous allons décrire la reproduction des essais de calage, et après Le tableau IV.2 récapitule les valeurs des paramètres trouvées.

- **Surface lisse:**

- ✓ Sable lâche

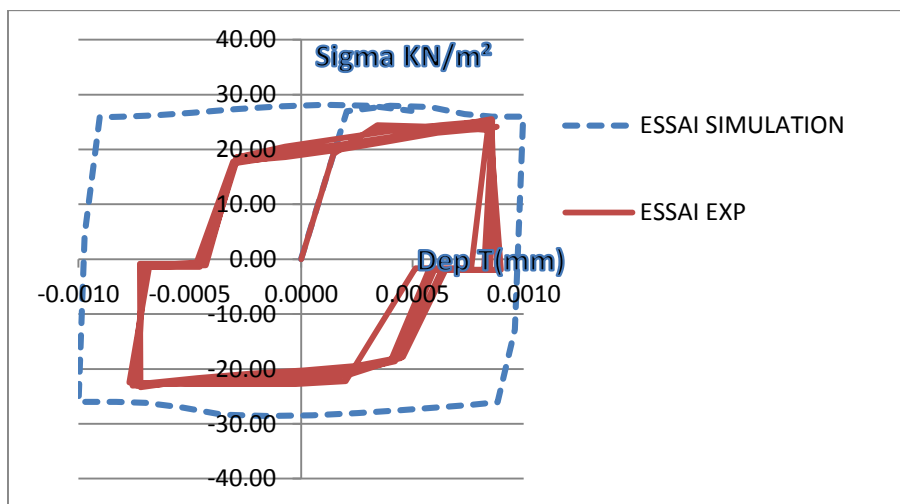


Figure .IV.29. Simulation des essais à contrainte normale constante, surface lisse (sable-acier)

Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 5 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

✓ Sable dense:

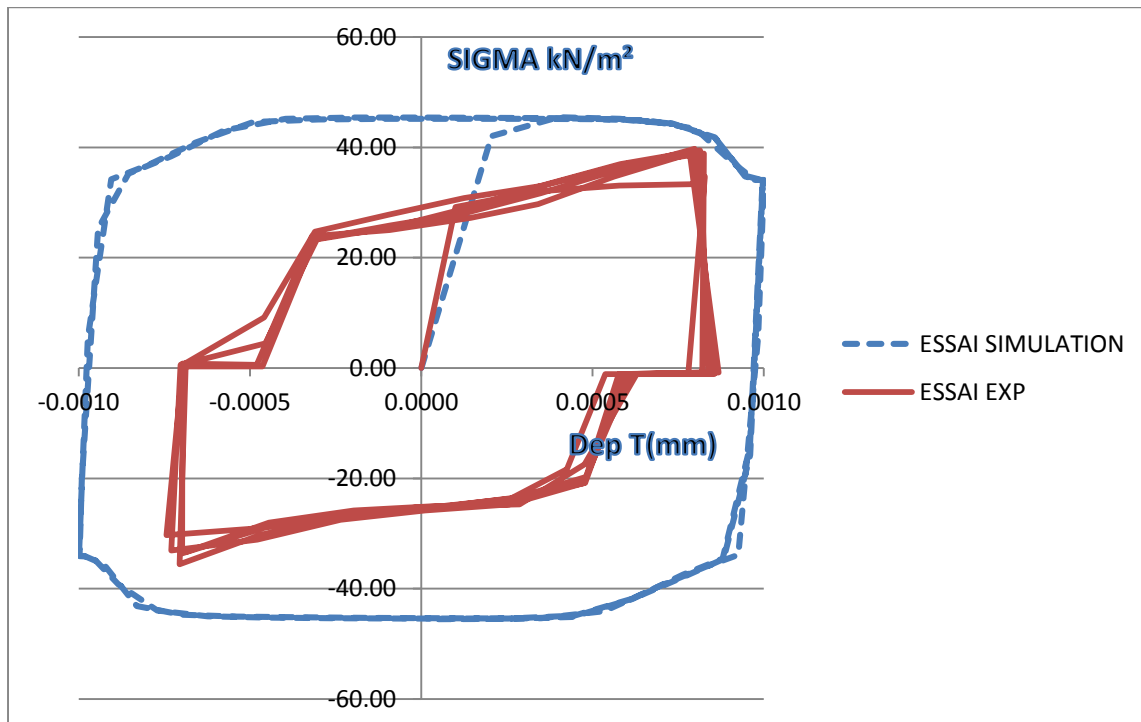


Figure .IV.30. Simulation des essais à contrainte normale constante, surface lisse (sable-acier), Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 5 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

- Surface rugueuse:

✓ Sable lâche:

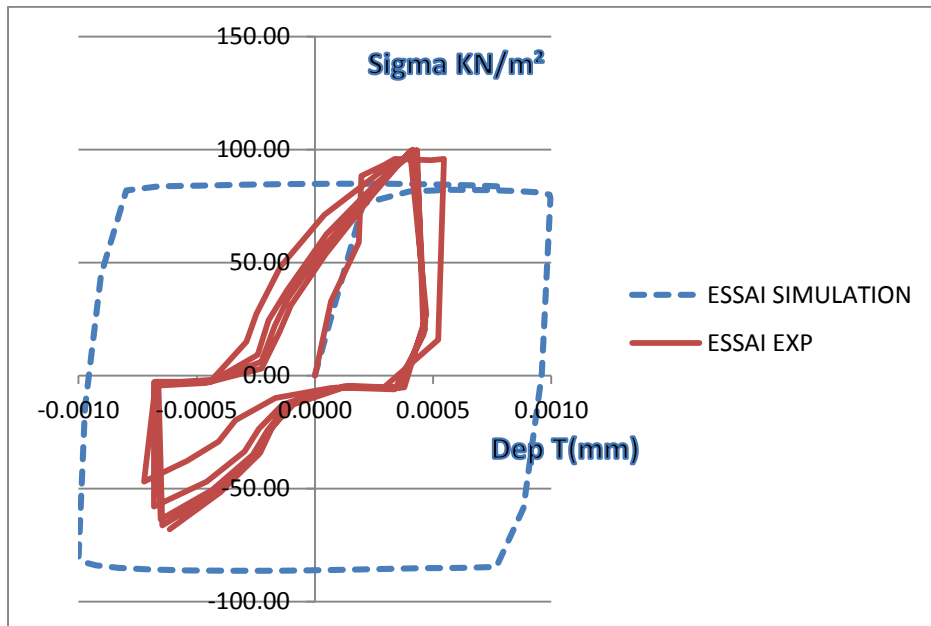


Figure .IV.31. Simulation des essais à contrainte normale constante, surface rugueuse (sable-acier), Sable lâche des dunes ($I_d=15\%$), 5 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

✓ Sable dense:

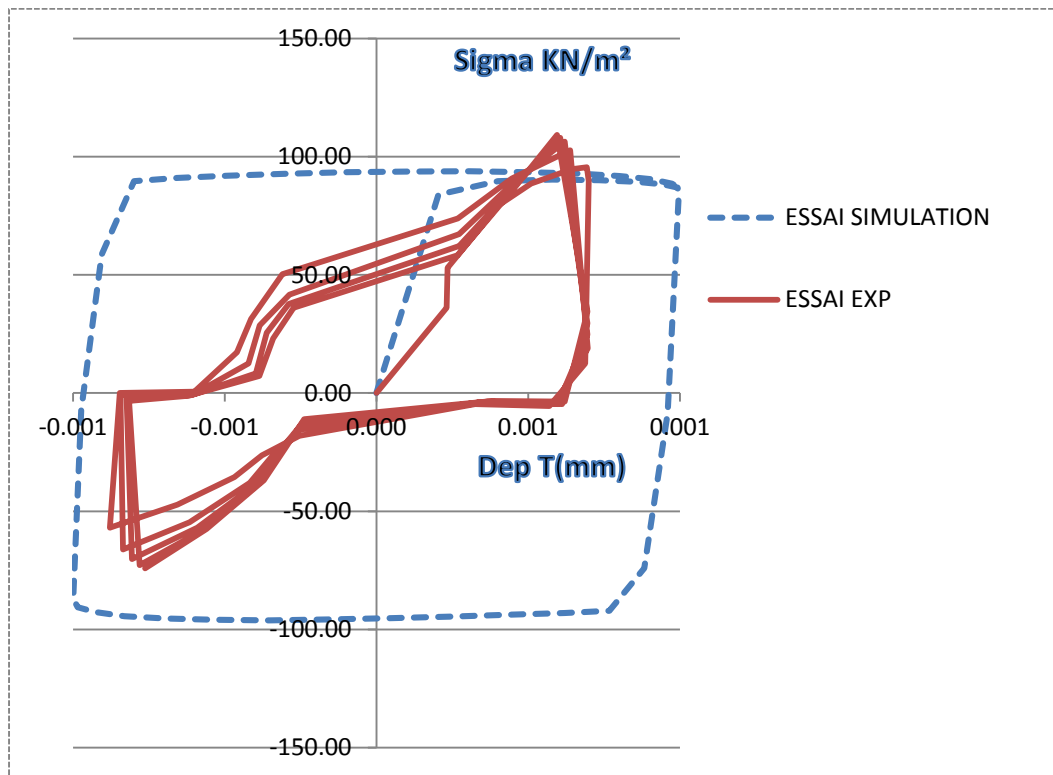


Figure .IV.31. Simulation des essais à contrainte normale constante, surface rugueuse (sable-acier), Sable dense des dunes ($I_d=90\%$), 5 CYCLE

les résultats de simulation d'un essai cyclique à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit moyennement l'évolution de la contrainte de cisaillement.

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACESOL- STRUCTURE

				β	G	η
ESSAI SOL_STRUCTURE	SURFACE LISSE	expérimentale	Sable lâche	0.362	0.735	0.724
			Sable dense	0.336	0.869	0.672
		simulation	Sable lâche	0.648	0.624	1.296
			Sable dense	0.739	0.577	1.478
	SURFACE RUGUEUSE	expérimentale	Sable lâche	0.352	1.804	0.704
			Sable dense	0.260	1.23	0.520
		simulation	Sable lâche	0.609	0.84	1.218
			Sable dense	0.661	0.81	1.322

Tableau.IV.5.les paramètre β , G et η dans l'essai sable_structure

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire un travail de recherche théorique et numérique sur le comportement mécanique d'un sable de Boussaâda, 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) et par les conditions de drainage imposées (cisaillement drainé ou non drainé).

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 cyclique à contrainte normale constante sur le sable de Boussaâda (à faible et à forte densité) et des structures en acier (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.

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 :

- ❖ La contrainte de cisaillement cyclique à l'effort normal constant diminuée dans le cas du sable dense et augmente dans le cas du sable lâche.
- ❖ l'interface montre un comportement se contractant après chaque soumettre à une contrainte-inversion suivie d'épaississement.

L'application au calcul d'un massif sableux de caractéristiques comparables à celles du sable de Boussaâda effectuée à l'aide du code **PLAXIS** de calcul par éléments fini a permis de comparer entre eux les résultats des calculs obtenus par le modèle de Mohr-Coulomb (modèle de référence en géotechnique) aux résultats obtenus expérimentalement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **AUBRY D., MODARESSI A. & MODARESSI 11.** "A constitutive model for cyclic behavior of interfaces and its application in dynamic analysis" Euromech 248, Grenoble, 1989
- **BENCHEIKH, B.** Interaction sol structure: modélisation et résolution numérique. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Lille. Lille. France, 1991.
- **BJERRUM L. & LAMBVA A.** "Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay." Geotechnique, Vol. 16, No.1, 1966, pp. 1-20.
- **BOULON, M.,** Basic features of soil structure interface behavior. Comput. Geotech. 7, 1989, 115–131.
- **BOULON M. & NOVA R.** " Modeling of soil-structure interface behavior- A comparison between elastoplastic and rate *type model*" Computer & Geotechnique, Vol. 9, 1990 pp. 21 46.
- **Desai, C., Drumm, C., Zaman, M.,** Cyclic testing and modeling of interfaces. J. Geotech. Eng. ASCE 111 (GT6), 1985, pp 793–815.
- **Desai, C. S. and Negara, B. K.,** Modeling for cyclic normal and shear behavior of interfaces. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1988, 114(7), 1198-1217.
- **Evgin, E., Fakharian, K.,** Effect of stress paths on the behavior of sand-steel interfaces. Can. Geotech. J. 33, 1996, pp 853–865.
- **Fakharian, K., Evgin, E.** Élasto-plastic modeling of stress-path-dependent behavior of interfaces. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geotech. 24, 2000, 183–199.
- **Gennaro, V., Frank, R.,** Élasto-plastic analysis of the interface behavior between granular media and structure. Comput. Geotech. 29, 2002, 547–572.
- **IHCENE LAMRI << Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotone et cyclique >> mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère, Année 2008**
- **Imen SAID << Comportement des interfaces et modélisation des pieux sous charge axiale >>, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme docteur de l'école nationale des ponts et chaussées. le 8 Décembre 2006**
- **Jianping CAO << modélisation numérique des problèmes d'interfaces sable-pieu pour les très grands nombres de cycles développement d'une méthode de sauts de cycles >>, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Lille1 sciences et technologies, Le 09 Décembre 2010**
- **Khemissa M.** Communications aux Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur : « Risques géotechnique et environnementaux liés à l'aménagement ». INSA de Lyon, France, 27-29/06/2006.
- **KISHIDA H. & UESUGI M. (1987) -** "Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus" - Geotechnique 37, No. 1, 1987, pp. 45-52.

- **Meddah Abdelaziz**, « étude du comportement d'un sable de dune sous sollicitation triaxiales » ,Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Promotion :2008.
- **PLYTAS. C.** "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. 1985
- **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.
- **ROSCOE K. H.** "An apparatus for the application of simple shear to soil samples." *Proc. and Int. Conf. Soil Mecha. Found. Eng.* Vol. 1, 1953, pp. 186-191
- **SHAHROUR I. & BENCHEIKH B.** "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, 1992 , pp. 269-275. 104
- **SHAHROUR I. & REZAIE F.** " Etude en laboratoire du comportement d'interface sous chargements monotone et cyclique" - Sixième Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols appliquée, 1993 , pp. 400-408..
- **Tallah Naoui**, <<modélisation expérimentale et numérique du comportement des interfaces sol-structure >>,mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister, 30/04/2008.
- **YOSHIMI Y. & KISHIDA T.** "A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces" - Geotechnical testing Journal, GT JODJ, Vol. 4, No. 4, 1981, pp. 145-152.
- **ZAMAN M.M.; DESAI C.S. & DRUMM E.C.** "Interface model for dynamic soil structure interaction" - Jour. of Geotech. Engin., 1984, Vol. 110, No. 9.
- **PLAXIS (2002).** Finite element code for soils and rock analyses. Professional version, Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- **BARBAS, A. et FRANK, R.** Utilisation de la méthode des éléments finis en mécanique des sols dans le domaine de l'élastoplasticité. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,1982, Rapport de recherche LPC n°146,Paris, France.

Annexe

σ_n	(Kpa)	Contrainte normale
τ	(Kpa)	Contrainte de cisaillement
ε_n	(mm)	Déplacement relatif normal
ε_t	(mm)	Déplacement relatif tangentiel
τ	(Kpa)	Contrainte limite de cisaillement
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
ϕ	(degrés)	Angle de dilatance
δ'	(degrés)	Angle de frottement effectif
σ_{no}	(Kpa)	Contrainte normale initiale
G	(-)	Module de cisaillement
Id	(%)	Indice de densité
Dr	(%)	Densité relative
E	(Kpa)	Module d'Young
ν	(-)	Coefficient de Poisson
R_{inter}	(-)	Résistance d'interface
β	(-)	Coefficient d'amortissement
η	(-)	Coefficient de perte

Abréviation :

sigma KN/m² : la contrainte normale

Dep T(mm) : le déplacement normale suivant l'axe X

Dep N(mm) : le déplacement normale suivant l'axe Y

