

50376
1994
307

N° d'ordre : 1405

50376
1994
307

Laboratoire de Mécanique de Lille
URA CNRS 1441

Ecole Centrale de Lille
59651 Villeneuve d'Ascq- France

THESE DE DOCTORAT

présentée à
l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité
GENIE CIVIL

Titre
**ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELISATION
DU COMPORTEMENT DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES
SOUS CHARGEMENTS MONOTONE ET CYCLIQUE**

Par
Féreidoun REZAIE

Soutenu le 29 Novembre 1994 devant la commission d'examen composée de :
MM.

**MICHEAU P.
BOULON M.
MEIMON Y.
NAUROY J. F.
SHAHROUR I.**

**Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse**



D 030 059292 5



REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Mécanique de Lille, Département Sols-Structures à l'Ecole Centrale de Lille, sous la direction de Professeur Isam SHAHROUR. L'aide qu'il m'a apportée, les conseils qu'il m'a formulés et ses encouragements m'ont été précieux. Je le remercie vivement et l'assure de ma reconnaissance.

Monsieur P. MICHEAU Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille, m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Je tiens à lui témoigner de mes remerciements les plus sincères.

Monsieur M. BOULON Professeur à l'institut de Mécanique de Grenoble, a bien voulu accepter d'être rapporteur de ce travail, et me faire profiter de sa grande expérience. Je lui en suis profondément reconnaissant.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur I. MEIMON Ingénieur principal à l'Institut Français du Pétrole, qui malgré ses lourdes charges, a accepté d'être rapporteur de ce travail et m'a fait profiter de ses précieuses remarques.

Je remercie également Monsieur J. F. NAUROY Ingénieur de recherche à l'Institut Français du Pétrole, qui a bien voulu participer à ce jury et me faire profiter de son expérience.

Que tous mes collègues et amis avec qui j'ai passé d'agréables moments durant ces trois années au laboratoire trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements. Je citerai en particulier MM. Ali KHOSHRAVAN AZAR ; Said GHORBANBEIGI et Mounir ZAHER.

Je ne saurais oublier Thierry DUBOIS qui m'a souvent apporté son aide lors du travail expérimental et Maryse BOULOGNE pour sa gentillesse et son amabilité.

J'adresse un message particulier à mes parents, sans l'aide desquels ma présence ici n'aurait pu avoir lieu.

à mes parents

*à la mémoire de
Bagher et Mansour*

TABLE DES MATIERES

RESUME1
INTRODUCTION GENERALE.....2

CHAPITRE : 1

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATOIRE

1.1. APPAREILS D'ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES4
 1.1.1. Introduction.....4
 1.1.2. Appareil de cisaillement direct4
 1.1.3. Appareils de cisaillement simple5
 1.1.4. Appareil de cisaillement direct annulaire par torsion6
 1.1.5. Appareil de cisaillement par arrachement7
1.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE8
 1.2.1. Description de l'appareillage.....8
 1.2.2. Mode opératoire.....9
1.3. MATERIAUX ETUDIES11
1.4. TESTS DE REPETABILITE12

CHAPITRE : 2

ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT MONOTONE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

2.1. ESSAIS REALISES SUR LE SABLE D'HOSTUN13
 2.1.1. Surface rugueuse.....13
 2.1.1.1. Essais à contrainte normale constante.....13
 2.1.1.2. Essais à déplacement normal bloqué14
 2.1.2. Surface lisse16
 2.1.2.1. Essais à contrainte normale constante.....16
 2.1.2.2. Essais à déplacement normal bloqué17
 2.1.3. Etude des angles de frottement et de dilatance18
 2.1.4. Effet de la rugosité et de la densité initiale19
2.2. ESSAIS REALISES SUR LE SABLE QUIOU20
 2.2.1. Surface rugueuse.....20
 2.2.1.1. Essais à contrainte normale constante.....20

2.2.1.2.	Essais à déplacement normal bloqué	21
2.2.2.	Surface lisse	22
2.2.2.1.	Essais à contrainte normale constante	22
2.2.2.2.	Essais à déplacement normal bloqué	23
2.2.3.	Etude des angles de frottement et de dilatance	24
2.2.4.	Effet de la rugosité et de la densité initiale	24
2.3.	ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES SABLES D'HOSTUN ET QUIOU	26

CHAPITRE : 3

ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT CYCLIQUE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

3.1.	ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE D'HOSTUN	27
3.1.1.	Surface rugueuse	27
3.1.1.1.	Essais à contrainte normale constante	27
3.1.1.2.	Essais à déplacement normal bloqué	33
3.1.2.	Surface lisse	34
3.1.2.1.	Essais à contrainte normale constante	34
3.1.2.2.	Essais à déplacement normal bloqué	35
3.1.3.	Effet de la densité initiale et de la rugosité de la surface	36
3.2.	ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE QUIOU	37
3.2.1.	Surface rugueuse	37
3.2.1.1.	Essais à contrainte normale constante	37
3.2.1.2.	Essais à déplacement normal bloqué	38
3.2.2.	Surface lisse	39
3.2.3.	Effet de la densité initiale et de la rugosité de la surface	40

CHAPITRE : 4

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

4.1.	CHARGEMENT MONOTONE	41
4.1.1.	Analyse bibliographique	41
4.1.1.1.	Approche type contact	41
4.1.1.2.	Approche type couche mince	44

4.1.2.	Présentation du modèle MODJOIN	45
4.1.2.1.	Comportement élastique	45
4.1.2.2.	Partie plastique	45
4.1.2.3.	Règle d'écoulement	46
4.1.3.	Détermination des paramètres	48
4.1.3.1.	Paramètres élastiques K_0 et G_0	48
4.1.3.2.	Paramètres plastiques	48
4.1.4.	Simulation des essais d'interface	51
4.1.4.1.	Sable dense	51
4.1.4.2.	Sable lâche	52
4.2.	CHARGEMENT CYCLIQUE	53
4.2.1.	Introduction.....	53
4.2.2.	Formulation du modèle.....	53
4.2.2.1.	Partie élastique	53
4.2.2.2.	Surface de charge	53
4.2.2.3.	Règle d'écoulement	55
4.2.3.	Simulation des essais cycliques	57
4.2.3.1.	Surface rugueuse	57
4.2.3.2.	Surface lisse	58
CONCLUSION GENERALE		59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		60

RESUME

Le présent travail comporte une étude expérimentale et de modélisation du comportement de l'interface sols-structures. Il est composé de deux parties:

Dans la première partie, nous présentons les résultats des essais monotones et cycliques d'interface sols-structures qui ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Un intérêt particulier a été porté sur le comportement cyclique qui a fait l'objet de peu de travaux antérieurs. Les essais réalisés sont destinés au développement et à la validation des modèles d'interface sous chargements monotone et cyclique.

Dans la deuxième partie, le modèle d'interface Modjoin est validé sur les essais réalisés dans la première partie. La version monotone de ce modèle comporte les principaux concepts utilisés dans la modélisation des sols (écrouissage isotrope, état caractéristique, état critique, radoucissement ...). La version cyclique du modèle a dû être modifiée. La nouvelle version est basée sur la théorie de la plasticité à écrouissage cinématique couplée avec la technique de "bounding surface". Les tests de validation ont montré que le modèle décrit bien le comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique.

Mots-clés : Cisaillement, interface, sols-structures, rugueuse, lisse, écrouissage, radoucissement, durcissement, chargement cyclique, validation.

ABSTRACT

The present work includes experimental and modelling studies of the behaviour of soils-structures interface . It's composed of two parts :

In the first part, we present the results of monotonous and cyclic tests of soils-structures interface which were realised by means of a modified direct shearing box. A particular attention was paid to cyclic behaviour. Experimental results obtained in this study provide interesting data for the development and validation of soils-structures interface models under monotonous and cyclic loadings.

The second part, includes the validation of a soils-structures interface model named "Modjoin". The monotonous version of this model is based on the main concepts used in the modelling of the elastoplastic behaviour of the soil (isotropic hardening, characteristic state, critical state, softening, ..). The cyclic version of this model is based on kinematic hardening coupled with the "bounding surface" concept. Validation tests shows that this model well reproduces the behaviour of the soils-structures interface under both monotonous and cyclic loadings.

Key words : Shearing, interface, soils-structures, rough, smooth, softening, hardening, cyclic loading, validation.

INTRODUCTION GENERALE

De nombreux problèmes de Génie Civil sont concernés par l'interaction sols-structures. On cite comme exemples, les problèmes de pieux sous chargements axial ou latéral, de fondations superficielles sous chargements latéral ou excentré, d'ouvrages souterrains et d'ouvrages de soutènement (murs, rideaux de palplanches, parois moulées, ...). Ces ouvrages peuvent être soumis à des chargements monotones ou cycliques. Le chargement cyclique peut être de diverses origines : la houle, le vent, le trafic et le chargement sismique.

Compte tenu du comportement de ces ouvrages souvent conditionné par les conditions à l'interface, il est indispensable de développer des modèles fiables et capables de décrire le comportement de l'interface sous chargements monotone et cyclique. Si l'étude de ce comportement sous chargement monotone a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux (Potyondy, 1961; Wernick, 1979; Plytas, 1985; Jewell et Worth, 1987; Hoteit, 1990; Boulon et al, 1991; Moutraji, 1992) et de modélisation (Goodman et al, 1968; Ghaboussi et al, 1973; Meimon et al, 1981; Ottosen et Olsson, 1988; Boulon et al, 1988; Boulon et Nova, 1990; Rouainia et al, 1992 et Garnica, 1993), on note que peu de travaux ont été consacrés aux chargements cycliques. En effet, une analyse bibliographique a montré que les essais publiés (Desai, 1985; Youd et Budhu, 1985) ne comportaient pas de mesures du déplacement normal et que les modèles de comportement proposés (Desai et al, 1985; Aubry et Modaressi, 1989; Shahrour et Bencheikh, 1992) n'ont pas été validés sur des essais cycliques.

Ce travail a pour objectif d'apporter une contribution à la modélisation du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique. Devant le manque de base expérimentale sous chargement cyclique, une partie importante de ce travail a été consacrée à la réalisation des essais d'interface cycliques. Au cours de ces essais, nous avons étudié l'influence de nombreux paramètres, notamment : la minéralogie du sol, sa densité, la surface de l'interface, le niveau de confinement et l'amplitude du chargement. Ces essais ont servi ensuite à la validation d'une première version d'un modèle d'interface cyclique développé dans notre laboratoire. Les tests de validation ont révélé des imperfections au niveau du modèle. Aussi, grâce à notre travail expérimental, une nouvelle version du modèle cyclique a été développée et validée.

Le travail réalisé est présenté en quatre chapitres.

Le premier comporte une présentation des principaux appareillages utilisés pour l'étude en laboratoire du comportement de l'interface sols-structures. Les avantages et les défauts de chaque type d'appareil sont présentés. Ce chapitre comporte également une description du dispositif expérimental, du mode opératoire et une présentation des tests de répétabilité.

Le second chapitre est consacré à une étude, à la boîte de cisaillement, du comportement de l'interface sous chargement monotone. Cette étude a comporté des essais avec les sables d'Hostun et Quiou lâches et denses et des surfaces lisse et rugueuse et ceci en imposant une contrainte normale constante ou un déplacement normal bloqué.

Le troisième chapitre comporte une étude expérimentale sous chargement cyclique. Cette étude a été réalisée avec les deux sables (Hostun et Quiou) et des surfaces lisse et rugueuse en imposant la contrainte normale ou en bloquant le déplacement normal. Cette partie du travail a été soutenue par le projet Interface du Gréco-Géomatériaux.

Le quatrième chapitre concerne la modélisation du comportement de l'interface. Il est composé de deux parties : la première porte sur la validation de la version monotone du modèle **Modjoin**. La seconde comporte une modification de la version cyclique de ce modèle et sa validation sur des essais réalisés avec le sable d'Hostun.

CHAPITRE : 1

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATOIRE

.....

CHAPITRE 1 :

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATOIRE

Ce chapitre est composé de trois parties. La première comporte une présentation des principaux appareillages utilisés en laboratoire pour l'étude du comportement de l'interface sols-structures.

La seconde est consacrée à une description du dispositif expérimental utilisé et du mode opératoire suivi dans ce travail.

Enfin, la troisième comporte une présentation des matériaux étudiés et les résultats des tests de répétabilité.

1.1. APPAREILS D'ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

1.1.1. Introduction

La modélisation du comportement de l'interface sols-structures nécessite des études expérimentales de caractérisation mécanique. La plupart des travaux expérimentaux développés dans ce cadre portent sur le cisaillement entre un sol et une structure (béton, acier, bois ...).

L'étude du comportement de l'interface peut-être effectuée en laboratoire, à l'aide des appareils suivants:

- boîte de cisaillement direct,
- appareil de cisaillement simple,
- appareil de cisaillement direct annulaire par torsion et
- appareil de cisaillement par arrachement.

1.1.2. Appareil de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct consiste à remplacer la partie inférieure de la boîte de cisaillement par une plaque représentant la structure (Figure 1.1). Dans ce cas, le cisaillement est imposé le long de la surface de contact entre le sol, placé dans la partie supérieure de la boîte, et la plaque.

La facilité et la simplicité de cet appareil font qu'il est souvent utilisé pour déterminer des caractéristiques de frottement le long d'une surface imposée (Potyondy, 1961; Wernick, 1979; Plytas, 1985; Desai, 1985).

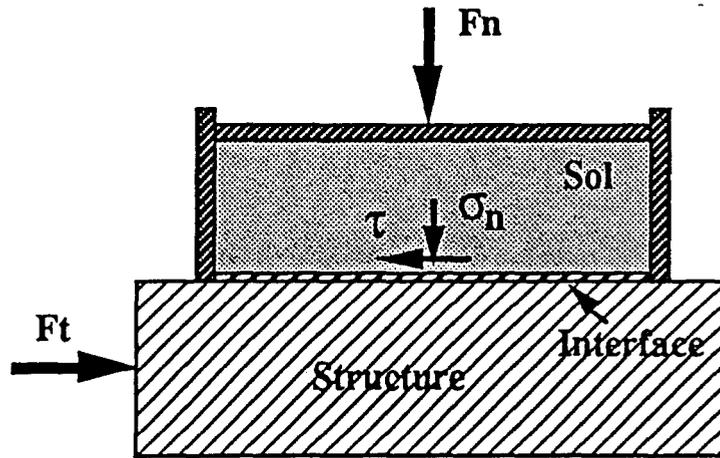


Figure : 1.1- Principe de la boîte de cisaillement direct

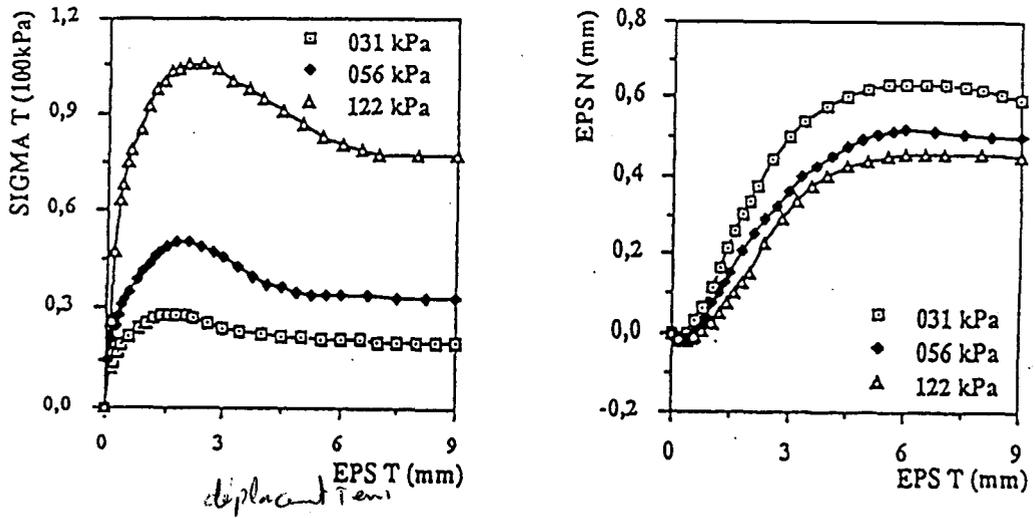


Figure : 1.2- Essais de cisaillement direct à contrainte normale constante. Sable d'Hostun, surface rugueuse (D'après Plytas, 1985)

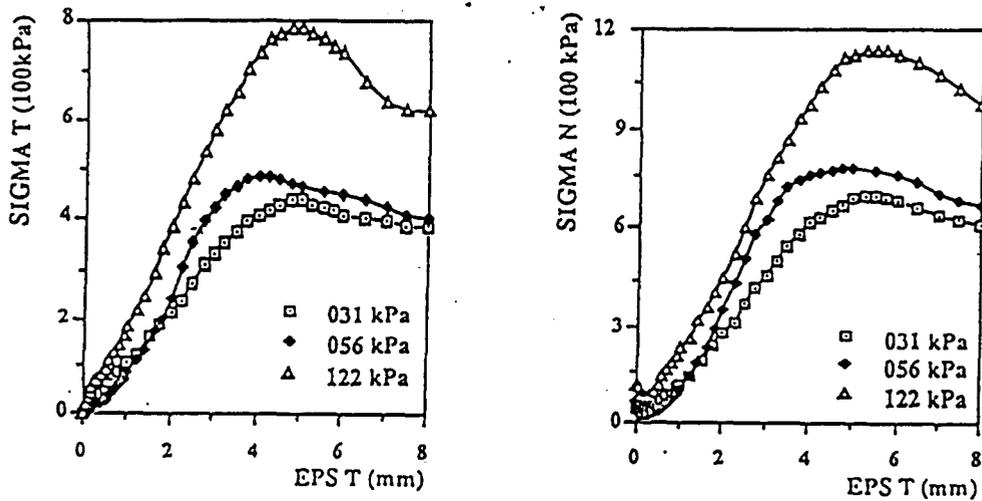


Figure : 1.3- Essais de cisaillement direct à déplacement normal bloqué. Sable d'Hostun, surface rugueuse (D'après Plytas, 1985)

Le défaut majeur de cet appareil réside dans les conditions aux limites imposées. En effet, ces conditions ne permettent pas à l'échantillon de se déformer librement et uniformément avec une indépendance complète des rotations des axes principaux des contraintes et des déformations. La contrainte et la déformation appliquées à l'échantillon dans la boîte de cisaillement manquent d'uniformité à cause des extrémités rigides de la boîte. La rupture a lieu progressivement avec une épaisseur variable au long de la zone cisailée (Saada et Townsend, 1981).

Généralement, on utilise pour la structure des plaques de dimensions plus grandes que celles de la boîte de type Casagrande. Dans ce cas, l'aire de l'interface au cours de l'essai reste constante et le risque de perte de matériau est faible. Desai et al (1981) et Jewel et Worth (1987) ont placé l'échantillon de sol et le matériau de construction dans une membrane en caoutchouc ce qui a permis de limiter la perte de matériau et de réaliser des essais cycliques.

A titre d'exemples, on donne dans les figures 1.2 et 1.3, les résultats des essais d'interface réalisés entre le sable d'Hostun et une plaque en acier (Plytas, 1985). On constate que :

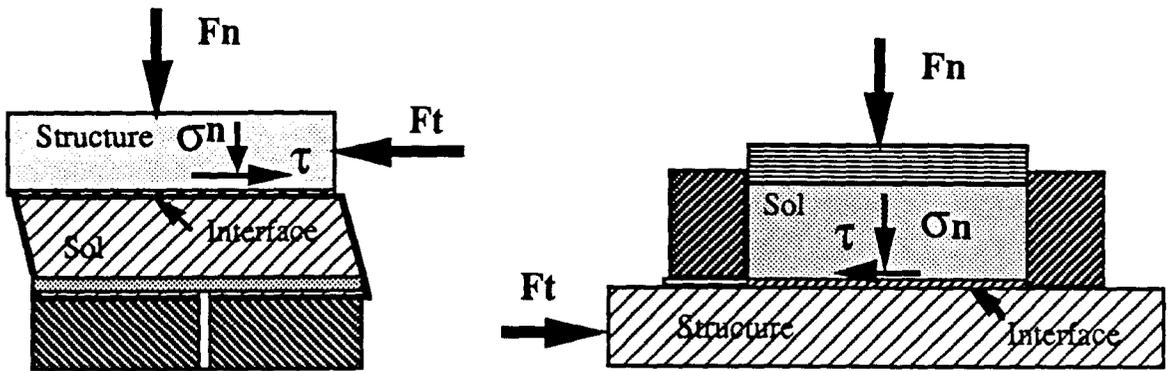
- Dans un essai à contrainte normale constante (Figure 1.2), la contrainte de cisaillement augmente progressivement avec le déplacement tangentiel jusqu'au pic, puis elle diminue pour atteindre une valeur limite qui demeure constante pour les grands déplacements. Le comportement dans le sens normal est contractant au début du cisaillement puis il devient dilatatant.

- Dans un essai à déplacement normal bloqué (Figure 1.3), la contrainte normale évolue : Au début de chargement, elle décroît à cause de la contractance et puis elle croît quand le matériau devient dilatatant pour atteindre un pic, après lequel elle décroît.

1.1.3. Appareils de cisaillement simple

L'appareil de cisaillement simple est utilisé pour réaliser des essais de frottement entre le sol et d'autres matériaux de constructions. Trois types d'appareils ont été développés et utilisés pour les essais d'interfaces:

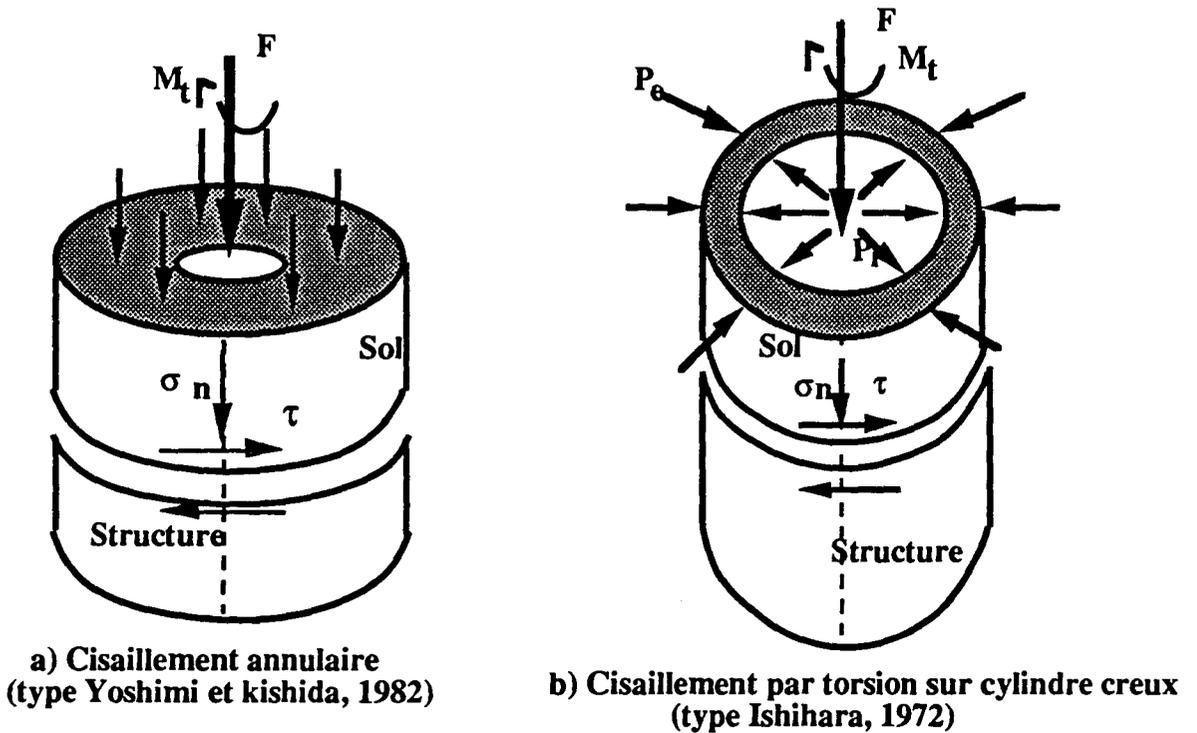
- l'appareil de cisaillement simple de type Roscoe (1953);
- l'appareil de cisaillement simple cylindrique de l'Institut Géotechnique de Norvège (NGI) conçu par Bjerrum et Lambva (1966) et
- l'appareil de cisaillement simple rectangulaire de Uesugi et Kishida (1987).



a) Type N.G.I (Bjerrum et Lambva, 1966)

b) Type Uesugi et Kishida (1987)

Figure : 1.4- Appareils de cisaillement simple



a) Cisaillement annulaire (type Yoshimi et kishida, 1982)

b) Cisaillement par torsion sur cylindre creux (type Ishihara, 1972)

Figure : 1.5- Appareils de cisaillement direct par torsion

Appareil de cisaillement simple type Roscoe

L'appareil de cisaillement simple conçu par Roscoe (1953) a été modifié à Cambridge. Dans cet appareil, l'échantillon est un prisme à section rectangulaire ou carrée enfermé dans un jeu de 6 plateaux rigides. Ce dispositif permet la déformation verticale et une distorsion uniforme de l'échantillon.

Des cellules de forces fixées sur les faces internes des plateaux ont été utilisées pour mesurer la contrainte principale intermédiaire. Une cellule placée sur le plateau supérieur permet de mesurer la force normale appliquée à l'échantillon.

Appareil de cisaillement simple type (NGI)

L'appareil de cisaillement simple type (NGI) a été présenté par Kjelleman (1951) et modifié par Bjerrum et Lambva (1966). Dans ce type d'appareils, l'échantillon cylindrique est renfermé dans une membrane renforcée par des spirales empêchant la déformation radiale de l'éprouvette (Figure 1.4a).

La force verticale est appliquée par des poids. Un appareil de déformation contrôlée a été utilisé pour appliquer un déplacement tangentiel. Les forces verticale et horizontale appliquées sur l'échantillon sont mesurées.

Appareil de cisaillement simple type Uesugi et Kishida

La figure 1.4b montre le principe de l'appareil de cisaillement proposé par Kishida et Uesugi (1987). L'interface sable-acier est un rectangle de 400 mm de longueur et 100 mm de largeur. L'échantillon de sable de la forme d'un parallépipède rectangle est renfermé dans une boîte construite d'un empilement de cadres en aluminium. La partie inférieure est constituée d'une plaque de dimensions plus grandes que celles de la boîte utilisée.

Ce type d'essais est plus proche de celui de cisaillement direct, mais il offre la possibilité de mesurer séparément le glissement à l'interface et la déformation de cisaillement au sein de l'échantillon.

1.1.4. Appareil de cisaillement direct annulaire par torsion

Afin d'améliorer l'uniformité des déformations au sein de l'échantillon et de permettre des grands déplacements, l'appareil de cisaillement direct annulaire par torsion a été développé.

Dans ce type d'appareils, l'échantillon et la structure ont une forme annulaire. Le cisaillement se fait par application d'un couple de torsion suivant des sections de contact entre le sol et la structure (Figure 1.5).

Selon les conditions aux limites sur les parois internes et externes de l'échantillon, on distingue deux catégories d'essais :

-l'essai de cisaillement annulaire sans confinement contrôlé (type Yoshimi et Kishida, 1982),

-l'essai de torsion sur cylindre creux avec contrôle du confinement (type Ishihara, 1972 ; Lade, 1975).

Cet appareil s'adapte bien aux chargements cycliques et permet d'atteindre des déformations importantes tout en gardant l'homogénéité de l'échantillon.

Son principal défaut réside dans les difficultés de fabrication de l'échantillon et de réalisation des essais.

1.1.5. Appareil de cisaillement par arrachement

L'essai d'arrachement consiste à appliquer un effort d'arrachement sur une tige placée dans un échantillon de sol cylindrique entouré d'une membrane en caoutchouc et soumis à une pression de confinement (Figure 1.6) (Brumund et Leonards, 1973). La force d'arrachement est appliquée directement à la tige (en matériau de constructions) placée le long de l'axe de l'échantillon.

Cet appareil permet d'atteindre du niveau des déplacements plus élevés que ceux autorisés par la boîte de cisaillement direct ou simple et de réduire la perte de matériaux.

Le défaut majeur de cet appareil réside dans les difficultés de mesurer l'état de contrainte et de déformation à l'interface.

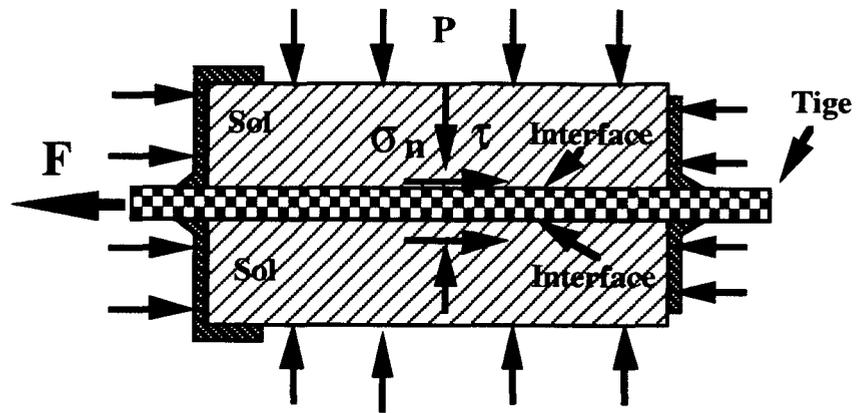


Figure : 1.6- Principe de l'essai d'arrachement (Brumund et Leonards, 1973)

1.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE

1.2.1. Description de l'appareillage

Le dispositif expérimental utilisé est illustré dans la figure 1.7. Il est composé de deux parties: un appareil de cisaillement et un système d'instrumentation et d'acquisition.

Appareil de cisaillement

La boîte de cisaillement direct a été modifiée pour la réalisation des essais d'interface (Figure 1.8). La partie inférieure a été remplacée par une plaque en acier à surface lisse ou rugueuse. Pour limiter la rotation de cette partie, elle a été calée des deux côtés (Figure 1.9). La surface rugueuse a été obtenue par collage de grains de sable sur la plaque d'acier. Les moyens disponibles au laboratoire n'ont pas permis de quantifier la rugosité de la surface. Dans la suite du texte, on va distinguer uniquement deux surfaces: une surface lisse constituée d'une plaque d'acier lisse et une interface rugueuse obtenue par collage du sable sur une plaque d'acier.

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 10 mm.

La partie supérieure de l'appareil de cisaillement a été modifiée pour la réalisation des essais à déplacement normal bloqué. Dans ce cas, un capteur de force est placé entre les bras d'application de la force verticale et la tige de l'échantillon. Ce dispositif permet de bloquer le déplacement normal et de mesurer l'évolution de la force normale.

Instrumentation

Deux capteurs de déplacement LVDT (Linear Variational Differential Transducer) et deux capteurs de force ont été utilisés pour mesurer le déplacement et la force dans les directions tangentielle et normale. Les caractéristiques des capteurs de déplacement sont récapitulés dans le tableau 1.1.

Capteur	Etendue de mesure (mm)	Non linéarité	Sensibilité
Capteur Hs 25 B	25.6	0.1 +/- %Fs	926.*10 ⁻⁶
Capteur Hs 10 B	11.0	0.1 +/- %Fs	52.*10 ⁻⁶

Tableau : 1.1 - Les caractéristiques des capteurs de déplacement

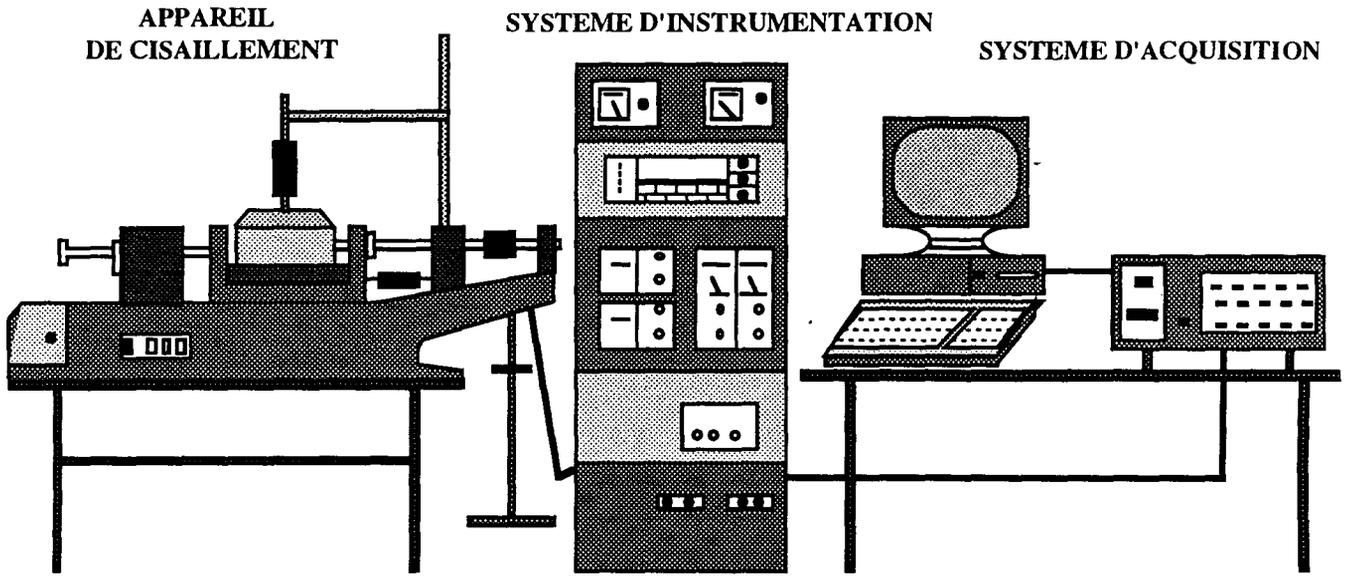


Figure : 1.7- Dispositif expérimental

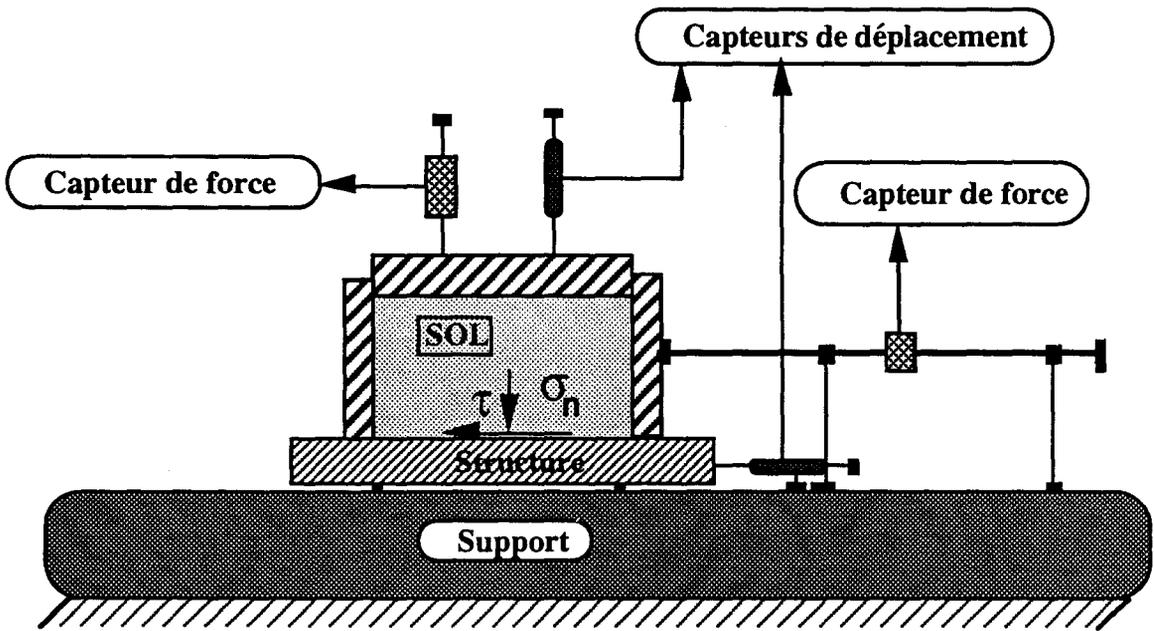
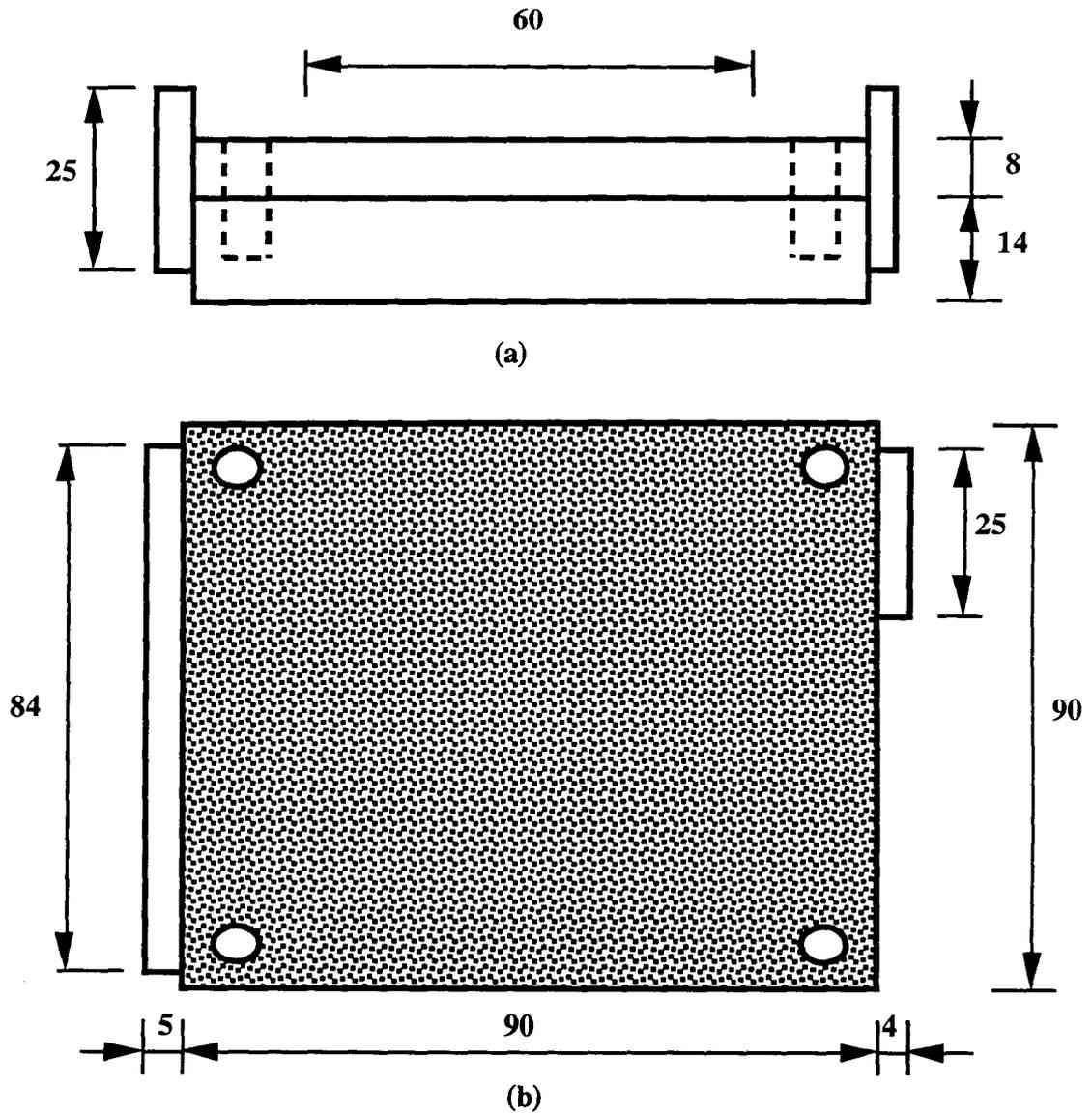


Figure : 1.8- Boîte de cisaillement direct modifiée



Figures : 1.9a et 1.9b - Plaque utilisée dans les essais de cisaillement

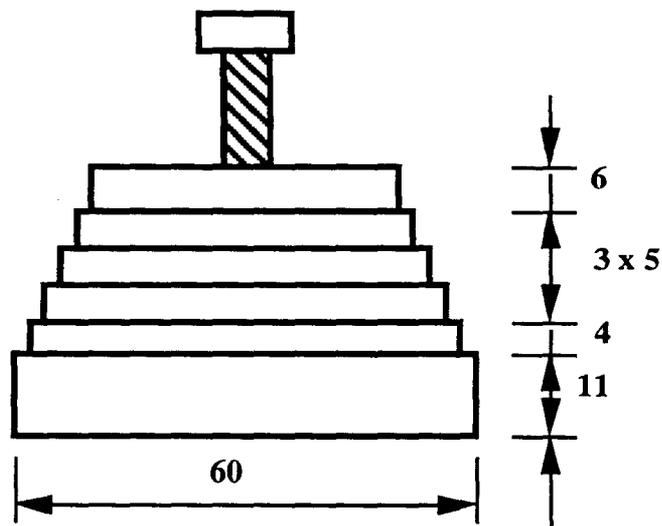


Figure : 1.10- Calibre utilisé pour la préparation des échantillons

Les caractéristiques des capteurs de force, sont:

- Type : N 1370
- Mode : Traction-Compression
- Etendue de mesure : 500 daN
- Ecart de linéarité : 0.05 % de l'e.m.
- Alimentation normale : 10 Volts
- Résistance normale d'entrée : 413.2 Ohms

L'asservissement est assuré à l'aide d'une centrale d'acquisition HP 3497A et d'un micro- ordinateur. Un programme a été développé pour l'analyse des résultats des essais: dépouillement par cycle, évolution des sommets des cycles et de leurs aires au cours de chargement.

1.2.2. 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. Cette hauteur est contrôlée par un calibre de 36 mm de hauteur (Figure 1.10). Connaissant le poids du volume versé, on calcule la densité initiale de l'échantillon.

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

Phase du cisaillement

Deux types de chemins peuvent être réalisés :

-Chemin à contrainte normale constante : On applique la contrainte normale et on procède au cisaillement à une vitesse de déplacement constante en mesurant l'évolution de la contrainte de cisaillement et du déplacement normal.

-Chemin à déplacement normal bloqué : On bloque le déplacement normal à l'aide du dispositif décrit précédemment et on procède au cisaillement à une vitesse constante, en mesurant l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale.

Le déroulement de l'essai est contrôlé par un micro-ordinateur. En cas d'anomalie, on arrête l'essai. Ces anomalies peuvent être de diverses origines, notamment:

- les jeux dans la boîte ou dans le système de transmission de la machine ou
- un défaut d'installation des capteurs.

1.3. MATERIAUX ETUDIÉS

Les essais ont été réalisés avec deux sables: le sable d'Hostun RF à granulométrie moyenne à grains quartzeux, homogènes, lisses, solides et résistants à la rupture. Le sable carbonaté de Quiou à granulométrie moyenne a été tamisé à 2,5 mm. Ce sable est composé de grains anguleux calcaires, non-homogènes et d'une forte quantité de carbonate de calcium et par conséquent d'une résistance faible à la rupture.

La figure 1.11 illustre les courbes granulométriques de ces sables. Leurs caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 1.2. L'indice des vides du sable d'Hostun varie entre 0,565 et 0,91 alors que celui du sable carbonaté varie entre 1,16 et 1,66.

Ces sables ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche à l'appareil triaxial. A titre d'exemples, on donne dans les figures 1.12 et 1.13 les résultats des essais drainés et non drainés réalisés par Mohkam (1983) sur le sable d'Hostun lâche. On peut constater que le comportement de ce sable est contractant au début du chargement et qu'ensuite, il devient dilatant. Le taux de dilatance dépend de la pression de confinement.

Les résultats des essais triaxiaux réalisés sur le sable carbonaté (Dogs Bay) par Golightly et Hyde(1988) sont donnés dans les figures 1.14a et 1.14b. On peut constater que le comportement de ce sable dépend sensiblement de la pression de confinement. Pour le faible confinement ($p_c \leq 50$ kPa), le matériau est caractérisé par une forte dilatance et par la présence d'un pic prononcé. Avec l'augmentation du confinement, la dilatance diminue. Pour les forts confinements ($p_c \geq 300$ kPa), le comportement de ce matériau devient contractant et on observe une disparition du pic.

Les valeurs de l'angle de frottement pour les sables d'Hostun et Carbonaté (dense et lâche), mesurées à l'appareil triaxial, sont données dans le tableau 1.3. L'angle de frottement du sable d'Hostun varie entre 38° et 41° pour les fortes densités et entre 33° et 35° pour les faibles densités (Mohkam, 1983), alors que celui du sable carbonaté varie entre 40° et 43° pour les fortes densités et entre 34° et 36° pour les faibles densités (Airey D.W. et Fahey. M. , 1991).

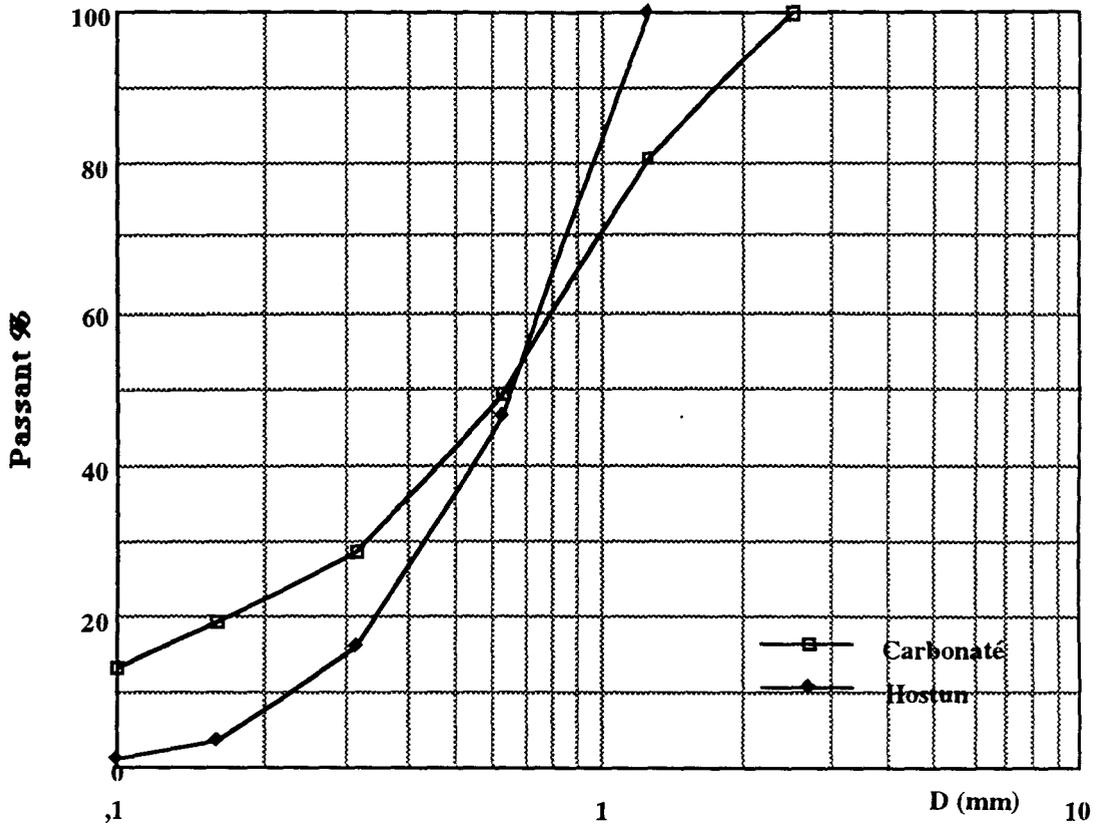


Figure : 1.11- Courbes granulométriques des sables testés

Matériaux	e_{min}	e_{max}	γ_{dmin} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	D ₅₀ (mm)
Hostun	0,565	0,91	13,87	16,93	26,5	0,65
Quiou	1,16	1,66	10,6	12,34	27,5	0,63

Tableau : 1.2- Les caractéristiques des sables d'Hostun et Quiou

Matériaux	ϕ -dense 'Triaxial'	ϕ -lâche 'Triaxial'
Hostun	38°-41°	33°-35°
Carbonaté	40°-43°	34°-36°

Tableau : 1.3- Les valeurs de l'angle de frottement des sables d'Hostun et carbonaté

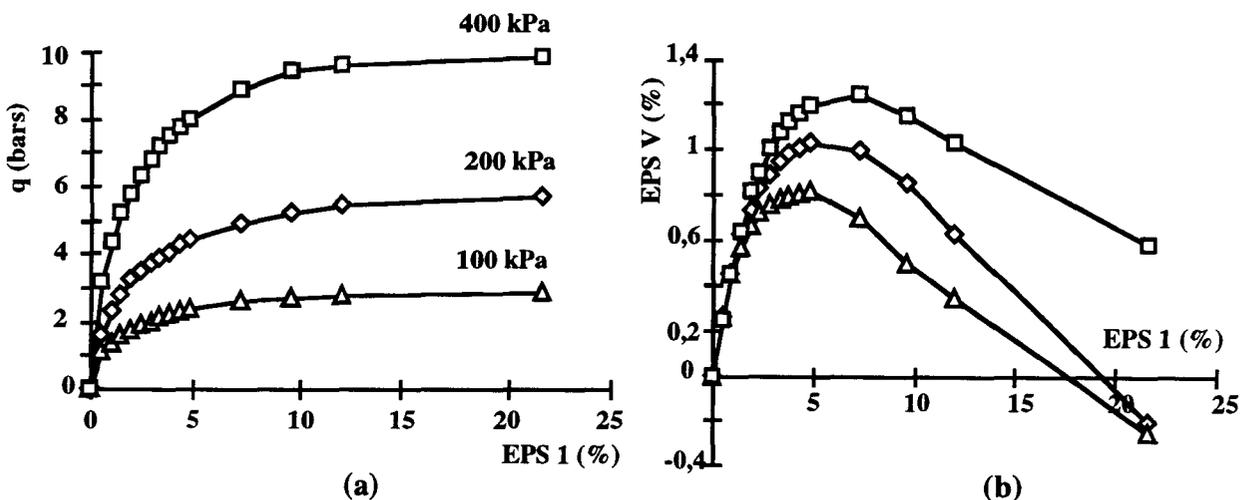


Figure : 1.12- Essais triaxiaux drainés en compression. (Mohkam, 1983)
(Sable d'Hostun lâche)

a : Evolution du déviateur
b : Evolution de la déformation volumique

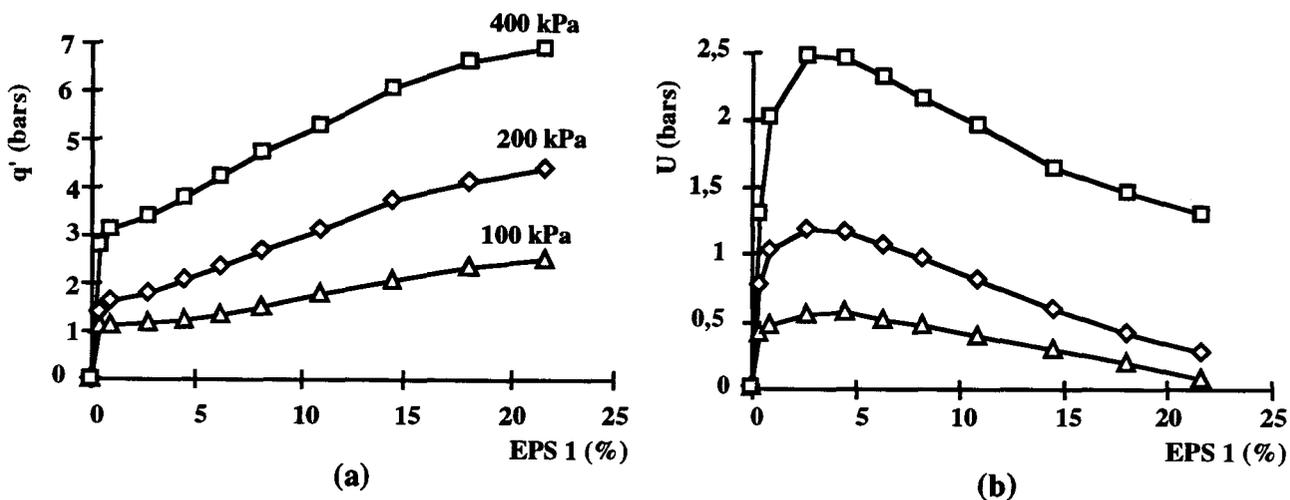
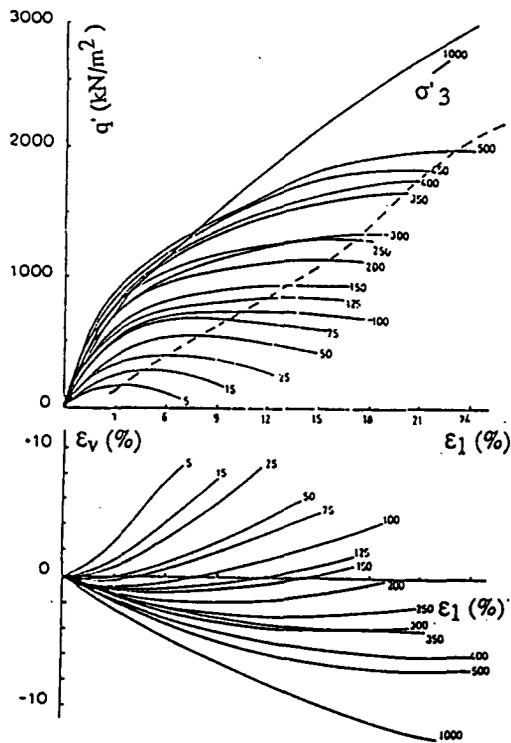
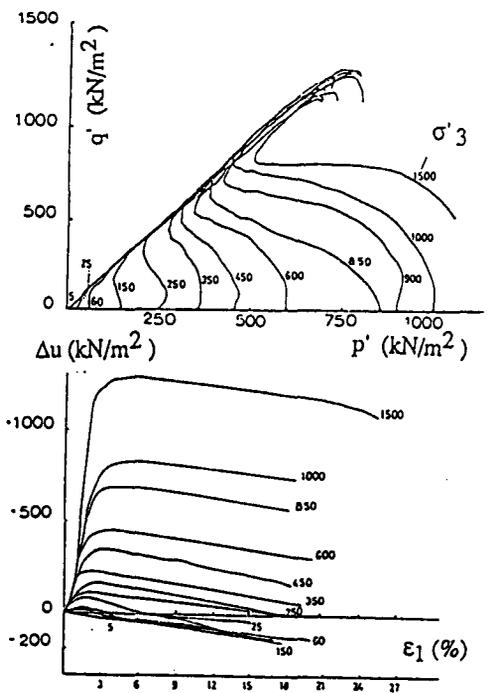


Figure : 1.13- Essais triaxiaux non drainés en compression. (Mohkam, 1983)
(Sable d'Hostun lâche)

a : Evolution du déviateur
b : Evolution de la pression interstitielle



a) Essai drainé



b) Essai non-drainé

Figure : 1.14- Essais triaxiaux sur sable carbonaté (Dogs Bay)
(D'après Golightly & Hyde, 1988)

1.4. TESTS DE REPETABILITE

Des tests de répétabilité ont été effectués avec le sable d'Hostun, afin de vérifier la fiabilité du dispositif expérimental et du mode opératoire suivi.

Les figures 1.15 et 1.16 présentent deux séries d'essais :

-La première comporte des essais avec une surface lisse à contrainte normale constante pour deux confinements (17 et 100 kPa) (Figure 1.15).

-La deuxième comporte des essais avec une surface rugueuse à contrainte normale constante pour deux confinements (17 et 100 kPa) (Figure 1.16).

Une analyse des résultats obtenus montre une bonne répétabilité des essais tant au niveau de la contrainte du cisaillement que du déplacement normal.

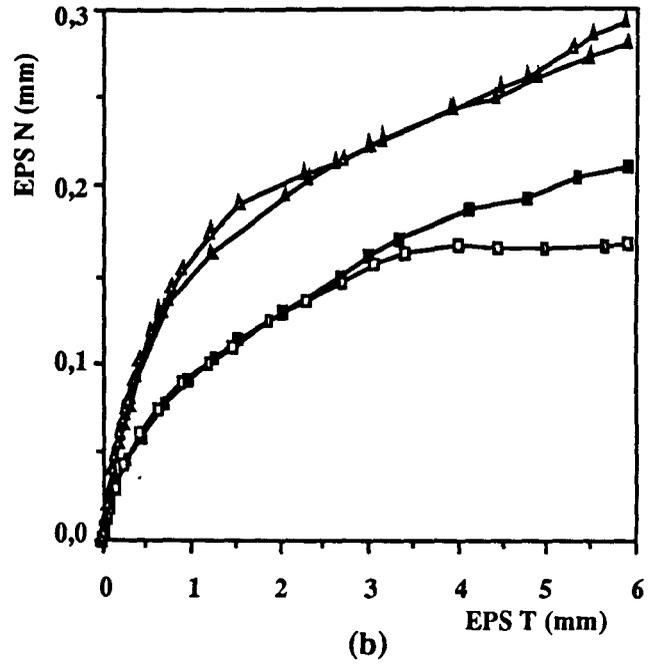
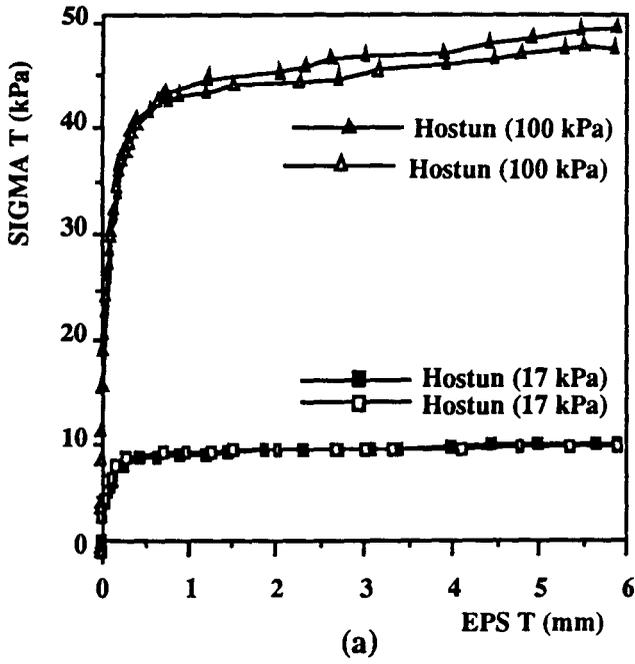


Figure : 1.15- Essais de répétabilité à contrainte normale constante.
Surface lisse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

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

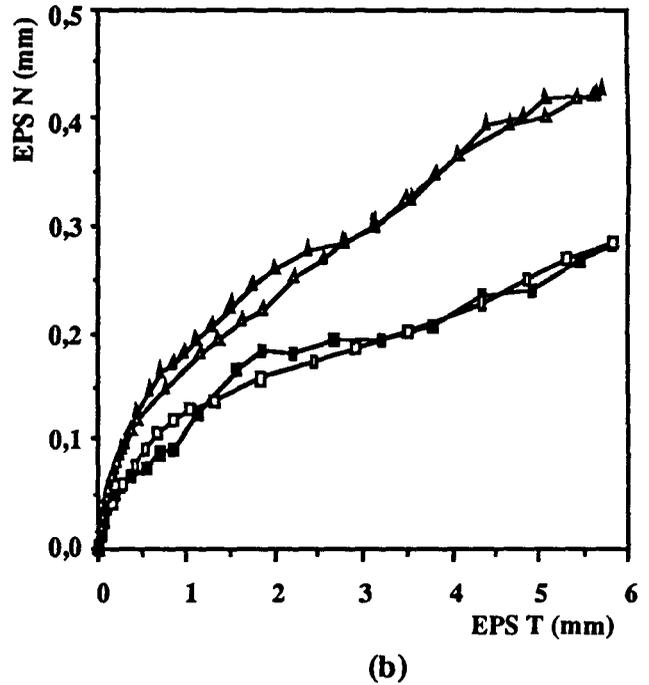
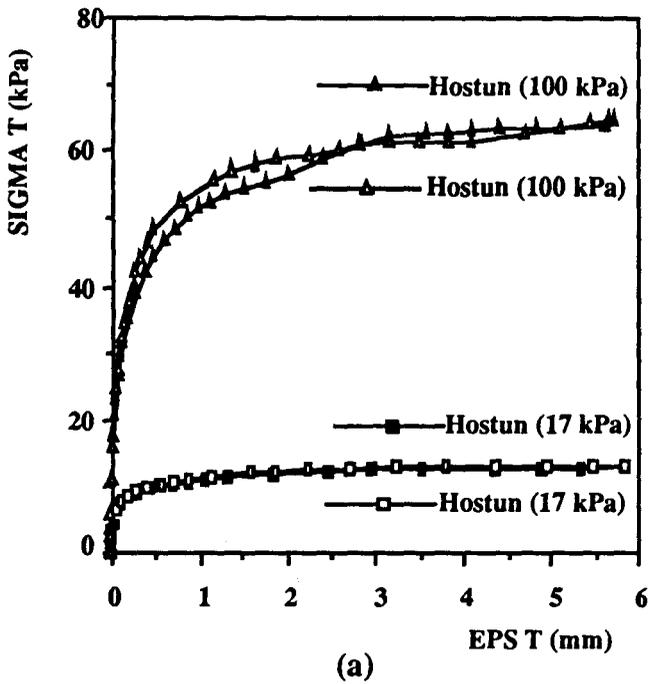


Figure : 1.16- Essais de répétabilité à contrainte normale constante.
Surface rugueuse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

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

CHAPITRE : 2

**ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT
MONOTONE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES**

.....

CHAPITRE 2 :

ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT MONOTONE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

Ce chapitre comporte une étude du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotones. Des essais ont été réalisés pour étudier l'influence de principaux paramètres sur le comportement de l'interface: type du sable (quartzeux (Hostun) ou calcaire (Quiou)), rugosité de la surface de la structure (lisse ou rugueuse), densité du sable (lâche ou dense), contrainte de confinement, et enfin, la condition imposée dans la direction verticale (déplacement ou contrainte imposé).

2.1. ESSAIS REALISES SUR LE SABLE D'HOSTUN

Introduction

Une série d'essais de cisaillement direct monotone a été réalisée pour étudier l'influence de principaux paramètres (la rugosité, la densité initiale et la contrainte normale initiale) sur le comportement de l'interface sols-structures. Les essais ont été effectués avec deux densités (élevée et faible) et deux types de surface (lisse et rugueuse). Deux chemins de chargement ont été réalisés: à contrainte normale constante et à déplacement normal bloqué. Dans le cas du sable lâche, une gamme de contraintes de 17 à 300 kPa a été explorée. Nous allons présenter ci-après, les résultats de ces différents essais.

2.1.1. Surface rugueuse

2.1.1.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

Afin d'étudier l'influence de la contrainte normale initiale, nous avons effectué des essais à trois valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100, 200$ et 300 kPa).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 2.1a et 2.1b. On constate que la contrainte de cisaillement augmente rapidement au début du chargement. Elle atteint un pic pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 2 mm, puis elle diminue pour se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm (Figure 2.1a). Le pic correspond à

l'effort de cisaillement qu'il faut appliquer pour provoquer le désenchevêtrement des grains dans le plan d'interface.

L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la figure 2.1b. On constate que le comportement au début de l'essai est contractant, ensuite, il devient dilatant (à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,5 mm), puis il revient contractant à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm. On note que la dilatance s'amplifie avec la diminution de la contrainte initiale appliquée.

Sable lâche

Des essais ont été réalisés avec le sable lâche à faible confinement ($\sigma_{n0} = 17, 24, 31$ et 62 kPa) et à fort confinement ($\sigma_{n0} = 100, 200$ et 300 kPa).

Une analyse des résultats obtenus (Figures 2.2a à 2.3b) montre que la contrainte de cisaillement croît rapidement au début de l'essai jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,5 mm, puis qu'elle continue à augmenter faiblement sans atteindre de palier.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le comportement du sable est contractant tout au long de l'essai et on n'observe pas de stabilisation de ce déplacement, même en fin de chargement. On constate également que le déplacement normal s'accroît avec la contrainte initiale. Cette influence devient moins importante lorsque la contrainte normale initiale est élevée ($\sigma_n \geq 100$ kPa).

2.1.1.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Deux essais ont été réalisés à déplacement normal bloqué ($\sigma_{n0} = 100$ et 300 kPa). Les résultats de ces essais sont illustrés dans les figures 2.4a à 2.4e. On constate que la contrainte normale évolue au cours du cisaillement (Figure 2.4b). Elle diminue en début de chargement, ensuite, elle augmente, à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,3 mm, et atteint un pic pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm.

La figure 2.4d illustre l'évolution de la contrainte mesurée lors d'un essai à déplacement normal bloqué et le déplacement normal mesuré lors d'un essai à contrainte normale constante. On constate que l'évolution de la contrainte normale (diminution ou augmentation) est bien corrélée avec celle du déplacement normal (contractance ou dilatance) lors des essais à contrainte normale constante.

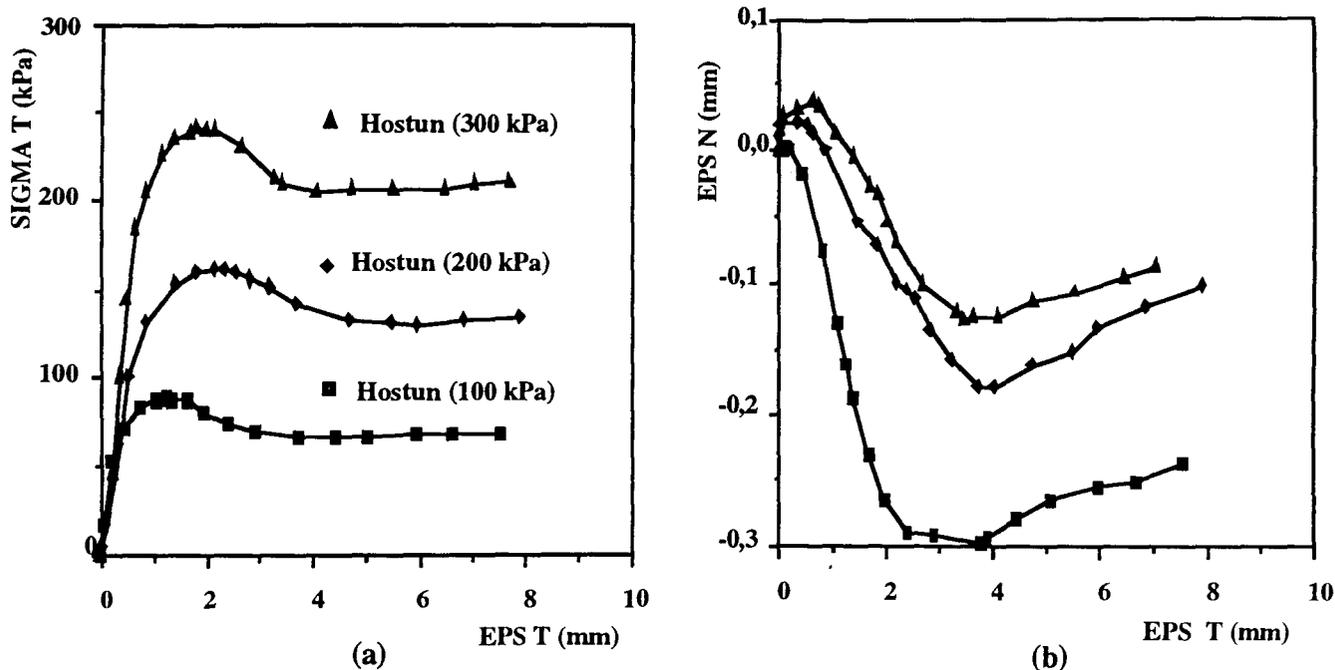


Figure : 2.1- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface rugueuse, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$)

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

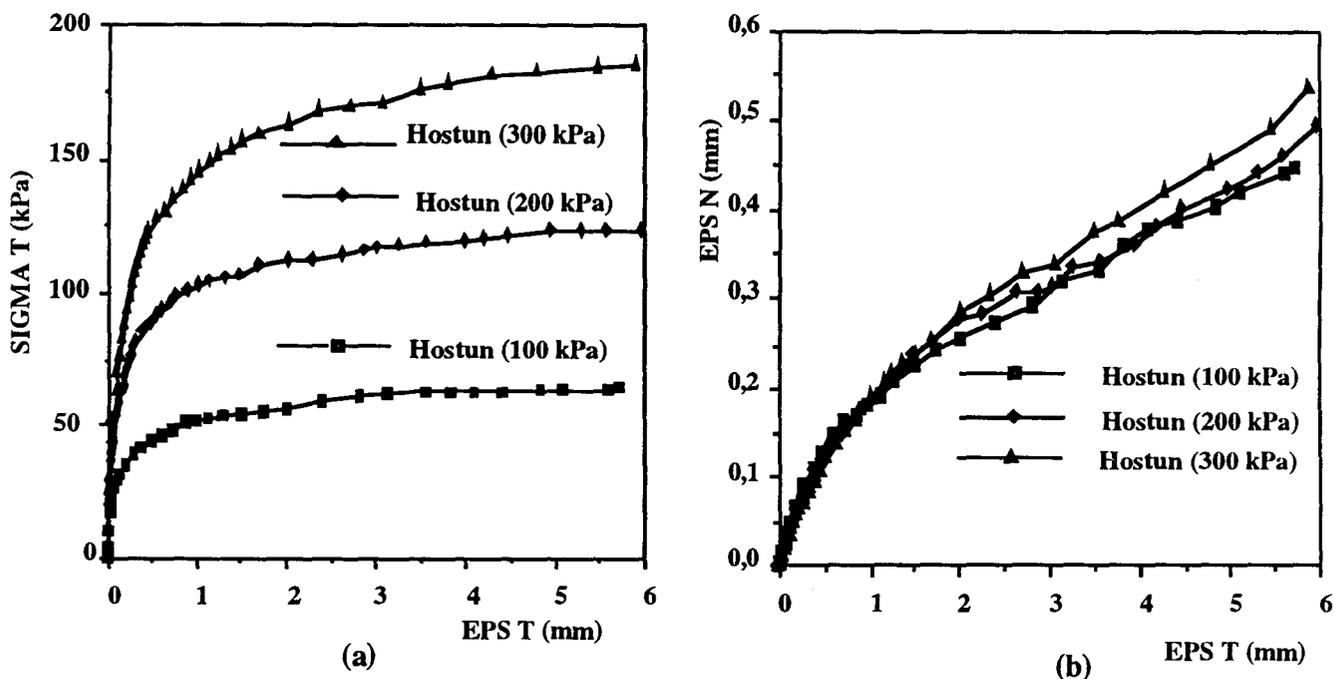


Figure : 2.2- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface rugueuse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

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

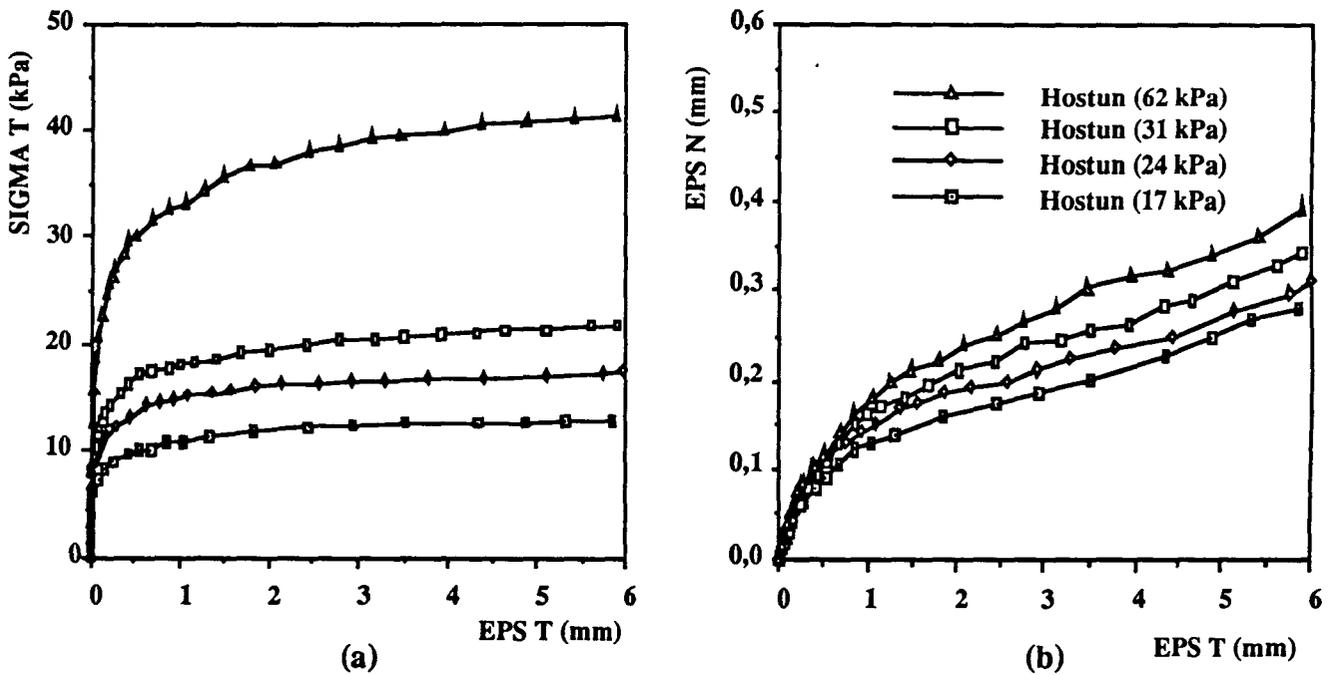


Figure 2.3- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface rugueuse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)
(Faible confinement)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

L'évolution de la contrainte de cisaillement est illustrée dans la figure 2.4a. On constate qu'elle augmente en début de chargement et atteint un pic pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm. Le maximum de la contrainte de cisaillement dépend sensiblement de la contrainte initiale appliquée. On note que dans le cas du sable d'Hostun dense, le blocage du déplacement normal induit une amplification de la résistance. Ceci est dû à l'augmentation de la contrainte normale induite par la dilatance (Figure 2.4b).

La figure 2.4c, illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée. La contrainte de cisaillement croît rapidement jusqu'au pic, puis elle croît en s'alignant sur une droite passant par l'origine et ayant une pente égale à l'angle de frottement au pic (c§. section 2.1.3.). En fin d'essai, l'état de contrainte diminue en s'alignant sur une droite passant par l'origine et ayant une pente égale à l'angle de frottement limite.

Sable lâche

Les figures 2.5a à 2.5c montrent les résultats de trois essais réalisés à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100$, 200 et 300 kPa).

Les résultats obtenus montrent que le comportement du sable est caractérisé par une diminution de la contrainte normale au cours de l'essai qui influence sensiblement l'évolution de la contrainte du cisaillement. Cette diminution est due au comportement contractant du sable. L'évolution des contraintes de cisaillement et normale lors de ces essais comporte trois phases (Figures 2.5a et 2.5b) :

- une première qui correspond à un déplacement tangentiel relatif compris entre 0 et 0,5 mm où la mobilisation de la contrainte de cisaillement est accompagnée d'une diminution de la contrainte normale;
- une deuxième qui correspond à un déplacement tangentiel relatif compris entre 0,5 mm et 1,5 mm où les contraintes tangentielle et normale évoluent modérément;
- une troisième phase qui correspond à une diminution importante des contraintes normale et tangentielle.

La figure 2.5c illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale. On constate que la contrainte de cisaillement croît rapidement jusqu'au pic, puis qu'elle décroît en s'alignant sur une droite passant par l'origine et dont la pente est égale au coefficient de frottement (c§. section 2.1.3.).

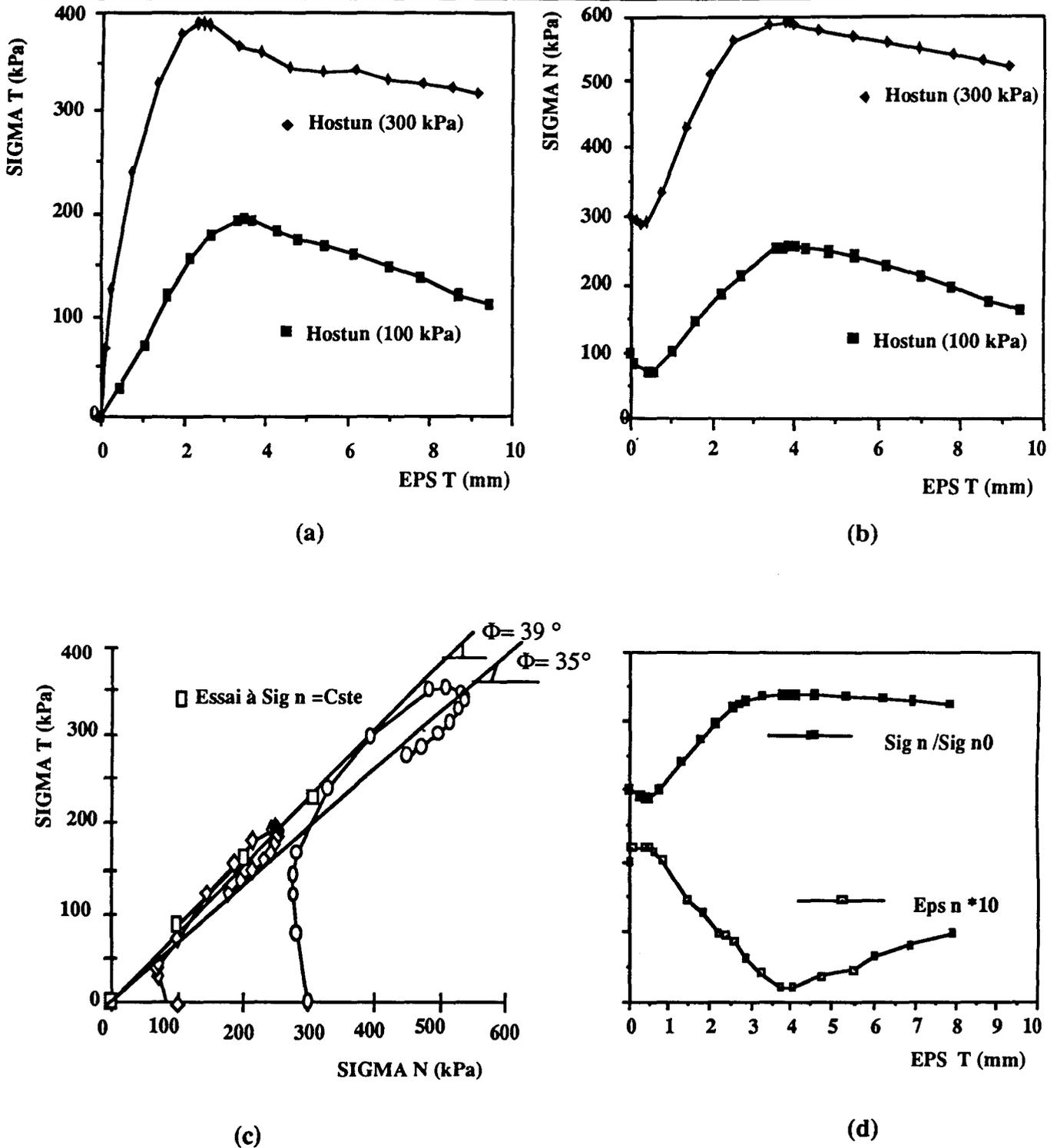


Figure : 2.4- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

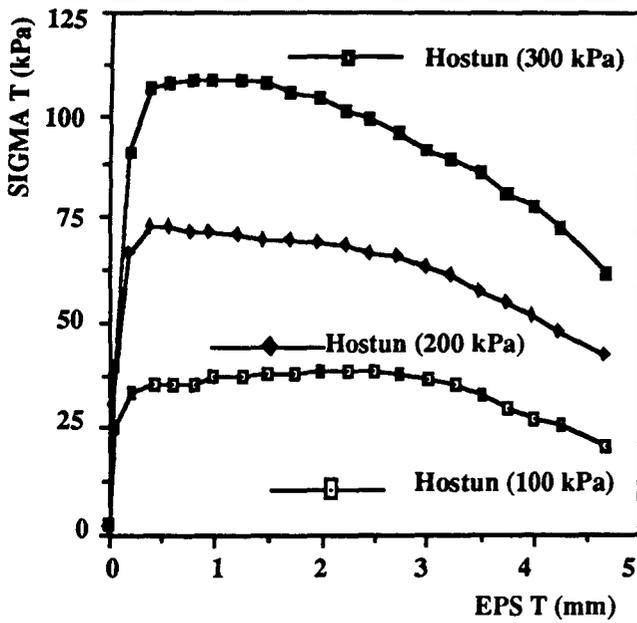
Surface rugueuse, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$)

a : Evolution de la contrainte tangentielle

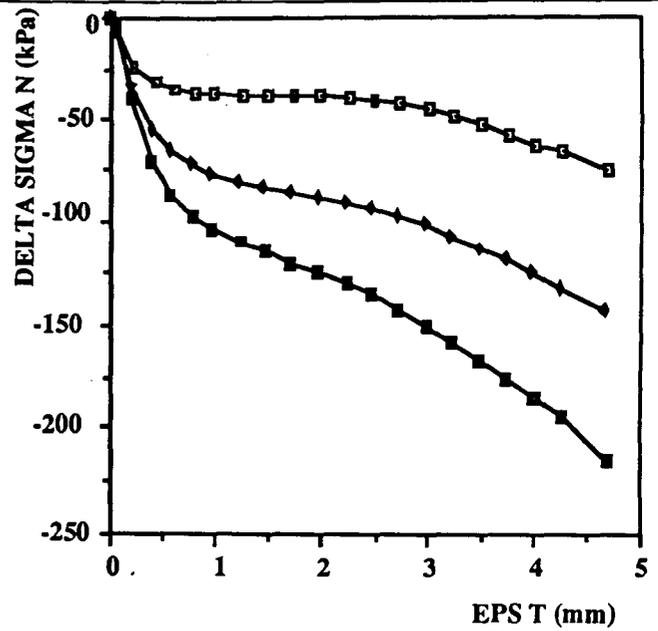
b : Evolution de la contrainte normale

c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

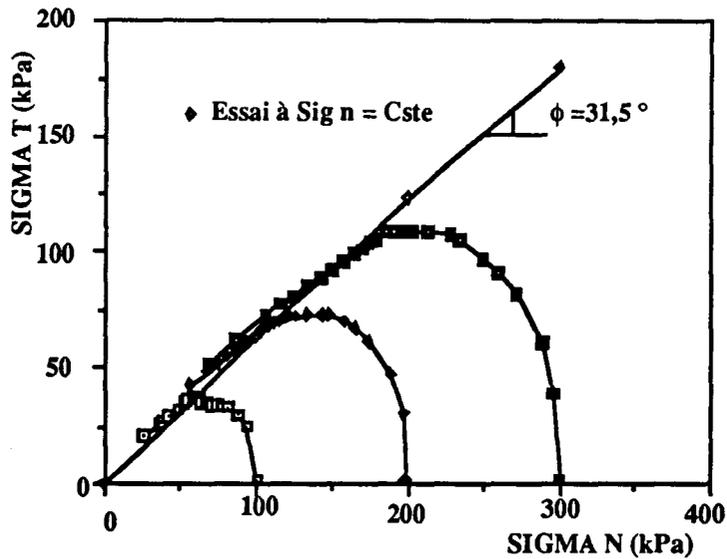
d : Comparaison des essais à déplacement normal bloqué et à contrainte normale constante



(a)



(b)



(c)

Figure : 2.5- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface rugueuse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

a : Evolution de la contrainte tangentielle

b : Evolution de la contrainte normale

c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

2.1.2. Surface lisse

2.1.2.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

Des essais ont été réalisés pour deux valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0} = 100$ et 300 kPa).

Les résultats sont illustrés dans les figures 2.6a et 2.6b. On constate que la contrainte tangentielle croît au début du chargement pour atteindre un pic, puis, elle diminue légèrement avant de se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 2 mm (Figure 2.6a).

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que le comportement du sable est contractant au début de l'essai, puis il devient dilatant. Le déplacement normal se stabilise à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm (Figure 2.6b).

Sable lâche

Sept essais ont été réalisés avec le sable d'Hostun lâche. Quatre essais à faible confinement ($\sigma_{n0} = 17, 24, 31$ et 62 kPa) et trois essais à des confinements plus forts ($\sigma_{n0} = 100, 200$ et 300 kPa).

Les résultats de ces essais sont illustrés dans les figures 2.7a à 2.8b. On constate que la contrainte de cisaillement croît rapidement au début du chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,6 mm, puis qu'elle continue à augmenter faiblement mais sans atteindre de palier.

Quant à l'évolution du déplacement normal, on note que le comportement du sable est contractant tout au long de l'essai et on n'observe pas de stabilisation de ce déplacement, même, en fin de chargement. On constate également que le déplacement normal s'accroît avec la contrainte initiale. Cette influence devient faible lorsque la contrainte normale initiale est élevée ($\sigma_{n0} \geq 100$ kPa).

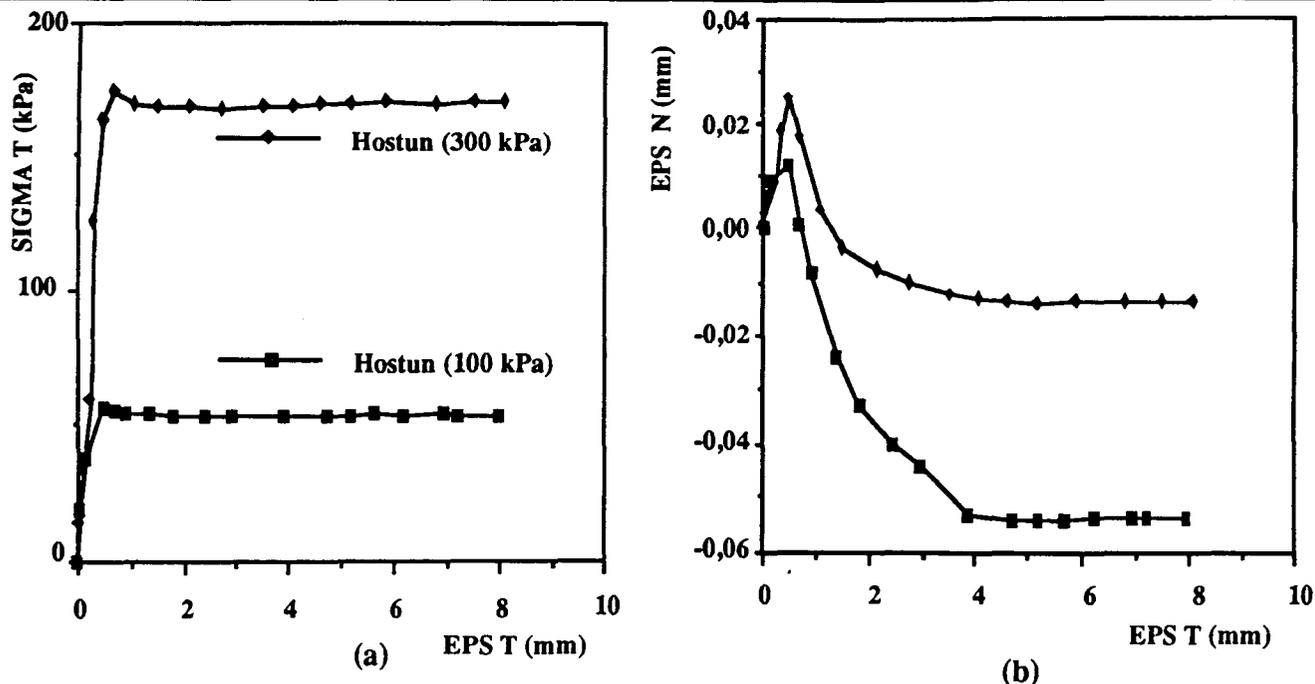


Figure : 2.6- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface lisse, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$)

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

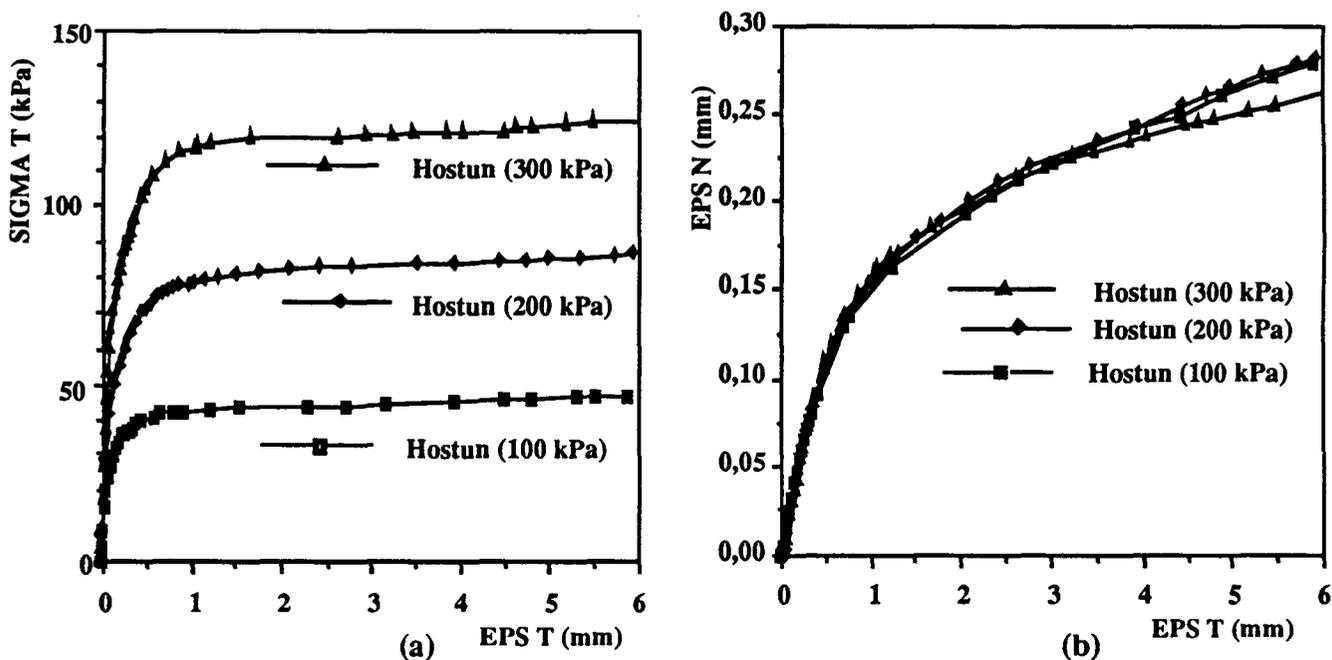


Figure : 2.7- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface lisse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

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

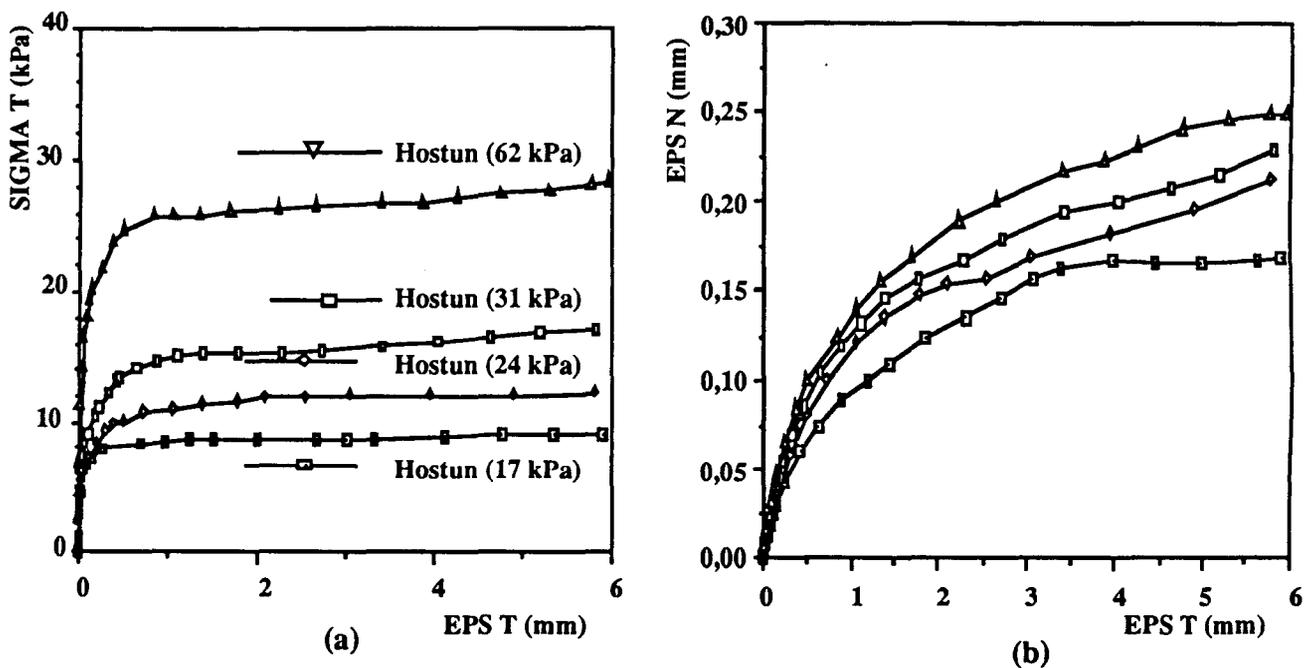


Figure 2.8- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface lisse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)
(Faible confinement)

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

2.1.2.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Des essais ont été réalisés avec deux valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=200$ et 300 kPa) .

La figure 2.9b illustre l'évolution de la contrainte normale. On constate que la contrainte normale évolue au cours du cisaillement. Elle diminue en début de chargement et ensuite, elle subit une augmentation. Enfin, elle se stabilise à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 2 mm.

La figure 2.9a montre l'évolution de la contrainte de cisaillement. On constate qu'elle augmente en début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 1 mm, après lequel, elle se stabilise.

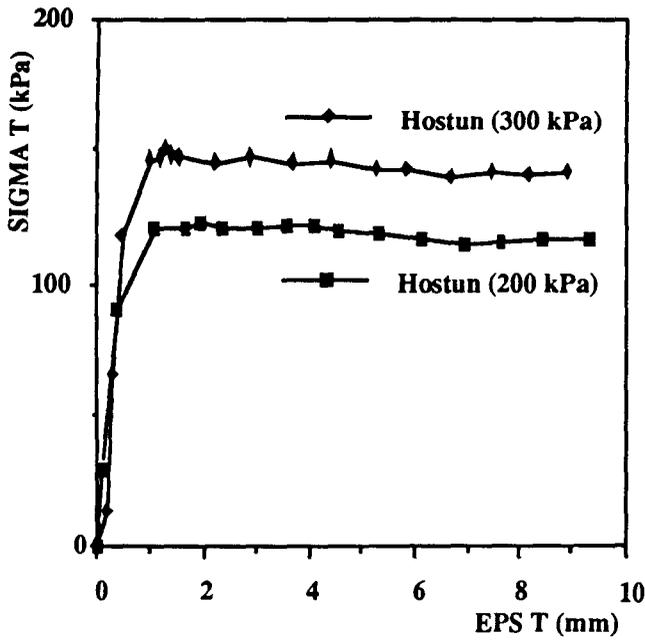
La figure 2.9c illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale. On note que dans le cas de l'essai à 200 kPa, la contrainte de cisaillement croît rapidement au début de chargement jusqu'à atteindre la surface limite.

Sable lâche

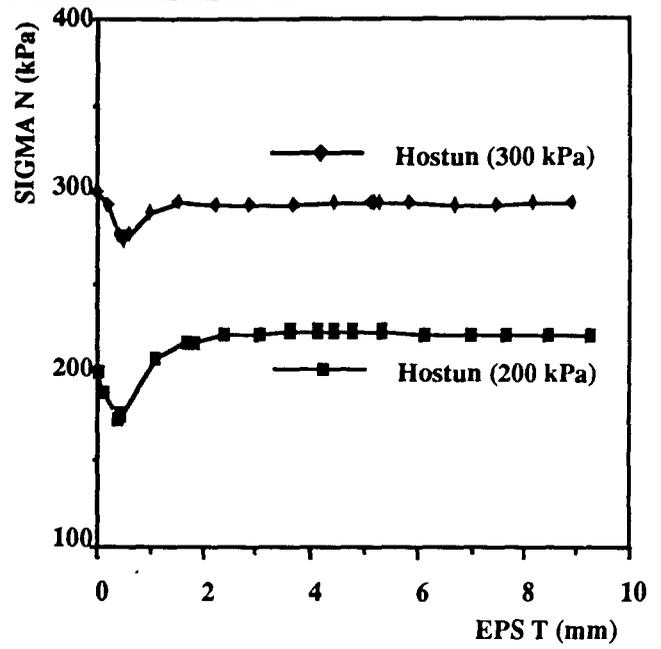
Des essais ont été réalisés à trois valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100$, 200 et 300 kPa) .

Les résultats obtenus (Figures 2.10a à 2.10c) montrent que la contrainte normale diminue tout au long de l'essai. Ceci est dû au comportement contractant de l'interface. En ce qui concerne la contrainte de cisaillement, on note une augmentation rapide de celle-ci au début du chargement jusqu'à atteindre un pic. Ensuite, elle diminue à cause de la diminution de la contrainte normale.

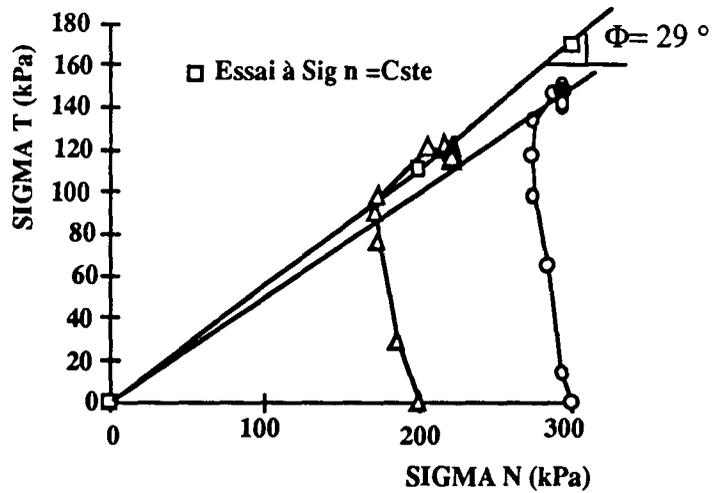
La figure 2.10c montre l'évolution de contrainte dans le plan (σ_n, τ). On constate que la contrainte de cisaillement augmente rapidement jusqu'à atteindre la surface limite, ensuite, elle décroît en s'alignant sur cette surface.



(a)



(b)



(c)

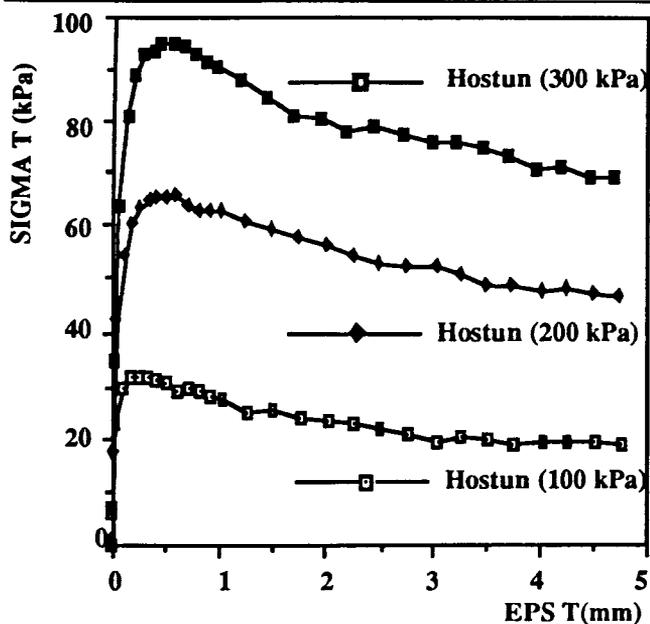
Figure : 2.9- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface lisse, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$)

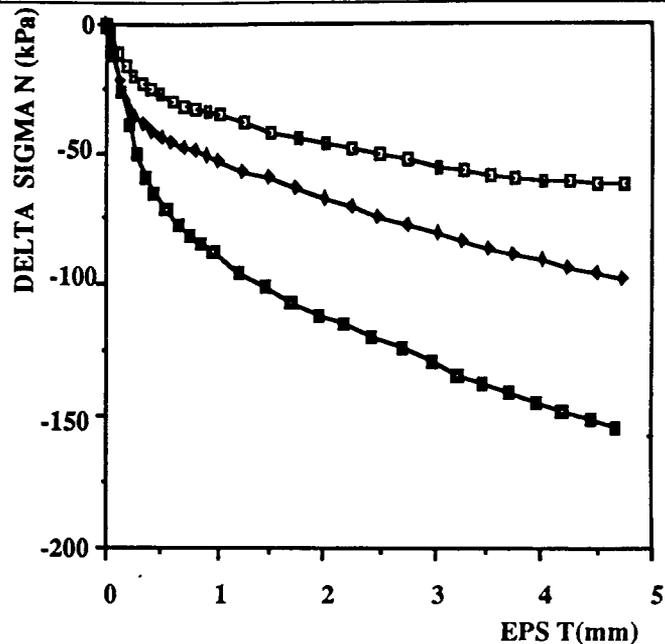
a : Evolution de la contrainte tangentielle

b : Evolution de la contrainte normale

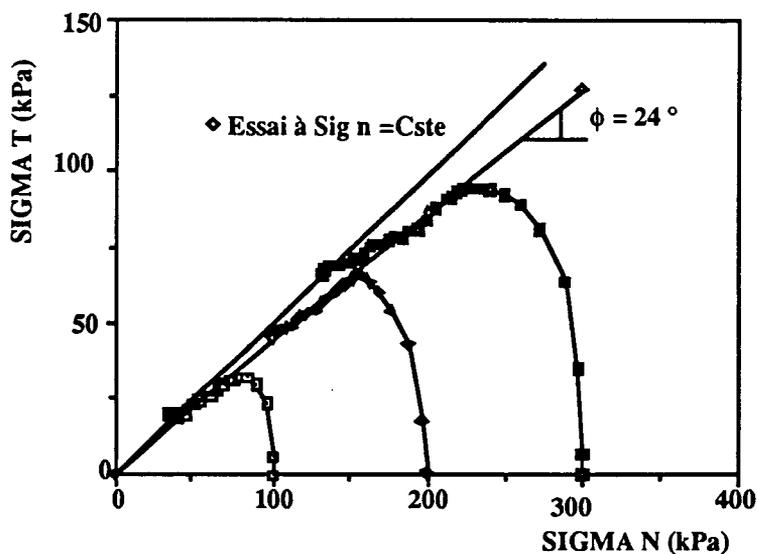
c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale



(a)



(b)



(c)

Figure : 2.10- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface lisse, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution de la contrainte normale

c: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

2.1.3. Etude des angles de frottement et de dilatance

Afin d'illustrer l'influence des propriétés d'interface et la contrainte de confinement sur les angles de frottement et de dilatance, nous avons reporté dans les figures 2.11 à 2.13b leur évolution avec la contrainte normale.

Ces angles ont été déterminés à partir de modèle de Mohr-Coulomb non associé. On détermine la valeur de l'angle de frottement (ϕ) par régression linéaire sur les points (σ_n, τ) à la rupture. La valeur de l'angle de dilatance est déterminée par la pente de la partie linéaire de la phase de dilatance dans le repère (ϵ_n, ϵ_t) (Figure 2.13b).

Une analyse de ces figures montre que :

-L'angle de frottement diminue avec le confinement, en particulier dans le domaine des faibles contraintes. Les essais sur sable lâche montrent que cet angle diminue de 4° lorsque la contrainte verticale croît de 17 à 100 kPa et de 1° lorsque la contrainte verticale croît de 100 à 300 kPa.

-Un écart moyen de l'ordre de 10° est noté entre les angles de frottement mesurés avec les surfaces rugueuse et lisse.

-L'angle de dilatance décroît avec la contrainte normale. Cette diminution est de l'ordre de 1° lorsque la contrainte normale croit de 100 à 300 kPa.

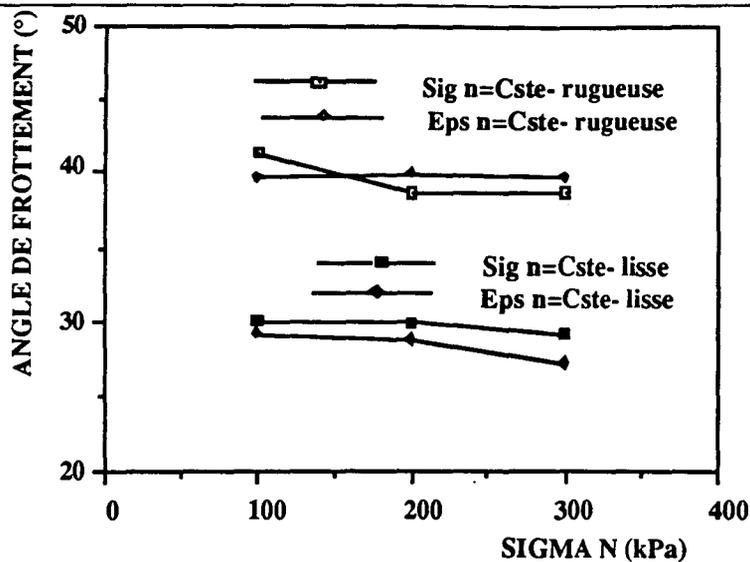


Figure : 2.11- Evolution de l'angle de frottement
Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$)

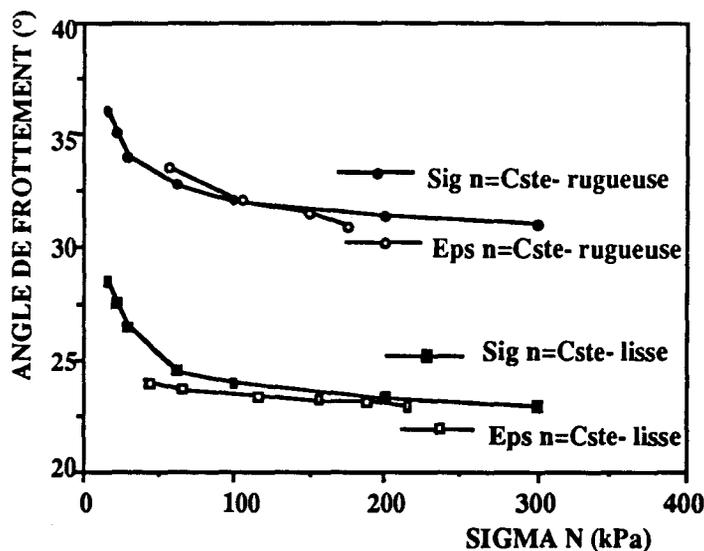


Figure : 2.12- Evolution de l'angle de frottement mesuré d'un déplacement tangentiel de 4mm. Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$)

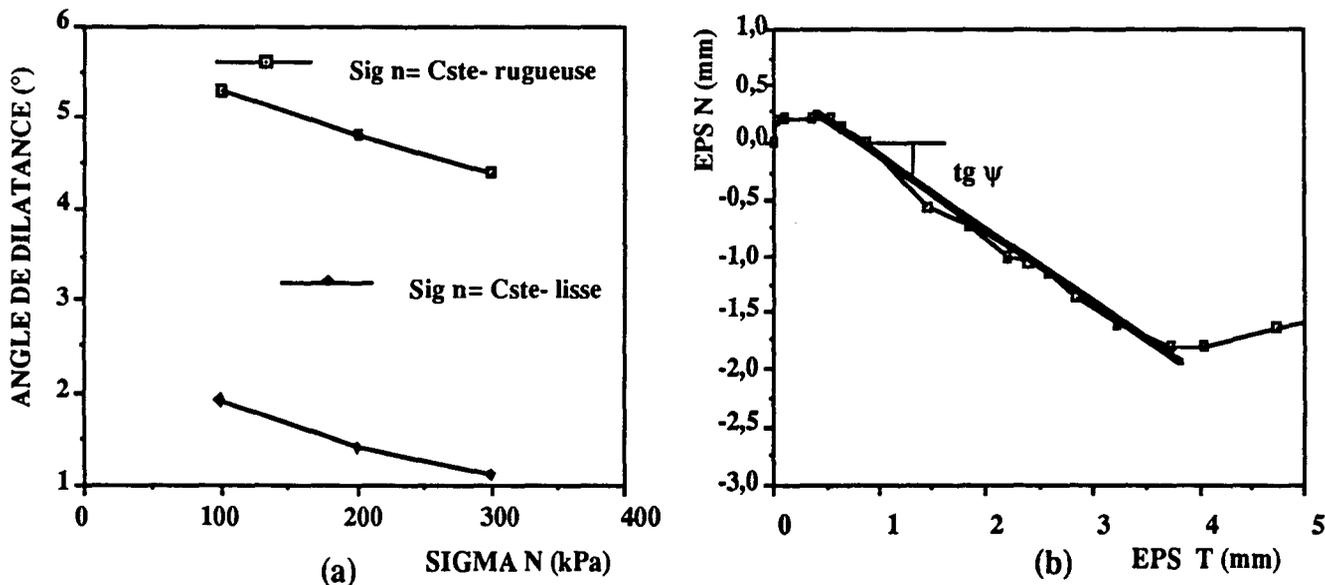


Figure : 2.13- a: Evolution de l'angle de dilatance. Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$)
b: Détermination de l'angle de dilatance

2.1.4. Effet de la rugosité et de la densité initiale

Afin d'illustrer l'influence de la rugosité de l'interface et de la densité initiale du sable sur le comportement mécanique de l'interface, nous avons reporté dans les figures 2.14a à 2.17b les résultats des essais à contrainte normale constante.

Densité initiale

Une analyse de ces résultats montre que le comportement de l'interface est très influencé par la densité initiale. On note que pour un sable dense, le comportement est dilatant avec radoucissement, alors que pour le sable lâche, l'interface est contractant tout au long de chargement sans apparition de pic (Figures 2.14a à 2.15b). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Yoshimi et Kishida (1981) et Boulon (1991).

Rugosité

La rugosité de l'interface modifie sensiblement son comportement: avec une surface lisse, on note un comportement de type élastique parfaitement-plastique avec une légère variation du déplacement normal, alors qu'avec une surface rugueuse, on note un écrouissage important accompagné d'une forte variation du déplacement normal (Figures 2.16a à 2.17b).

A titre d'exemple, on illustre dans la figure 2.18 les résultats obtenus par Kishida et Uesugi (1987) concernant l'influence de la rugosité de l'interface sur son comportement mécanique. On constate que la résistance au cisaillement augmente avec la rugosité. Le principe de mesure de la rugosité d'une surface utilisé par ces auteurs est illustré dans la figure 2.19.

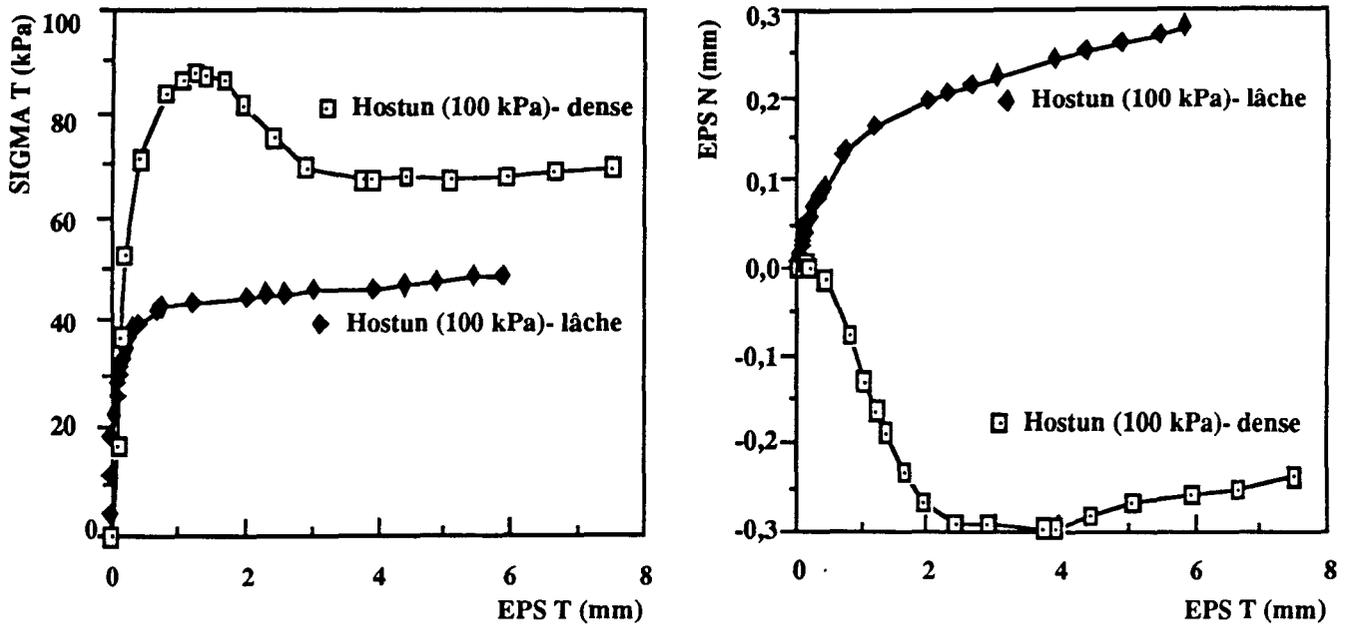


Figure : 2.14- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, sable d'HOSTUN, surface rugueuse

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

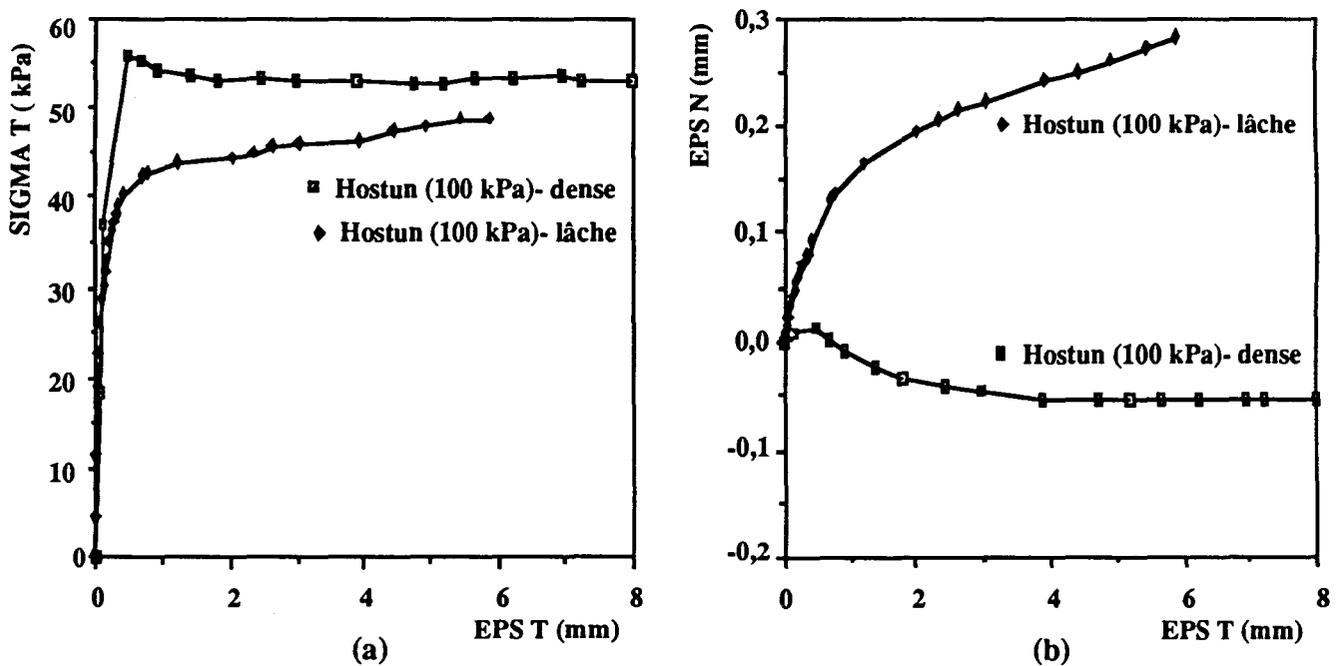


Figure : 2.15- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, sable d'HOSTUN, surface lisse

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

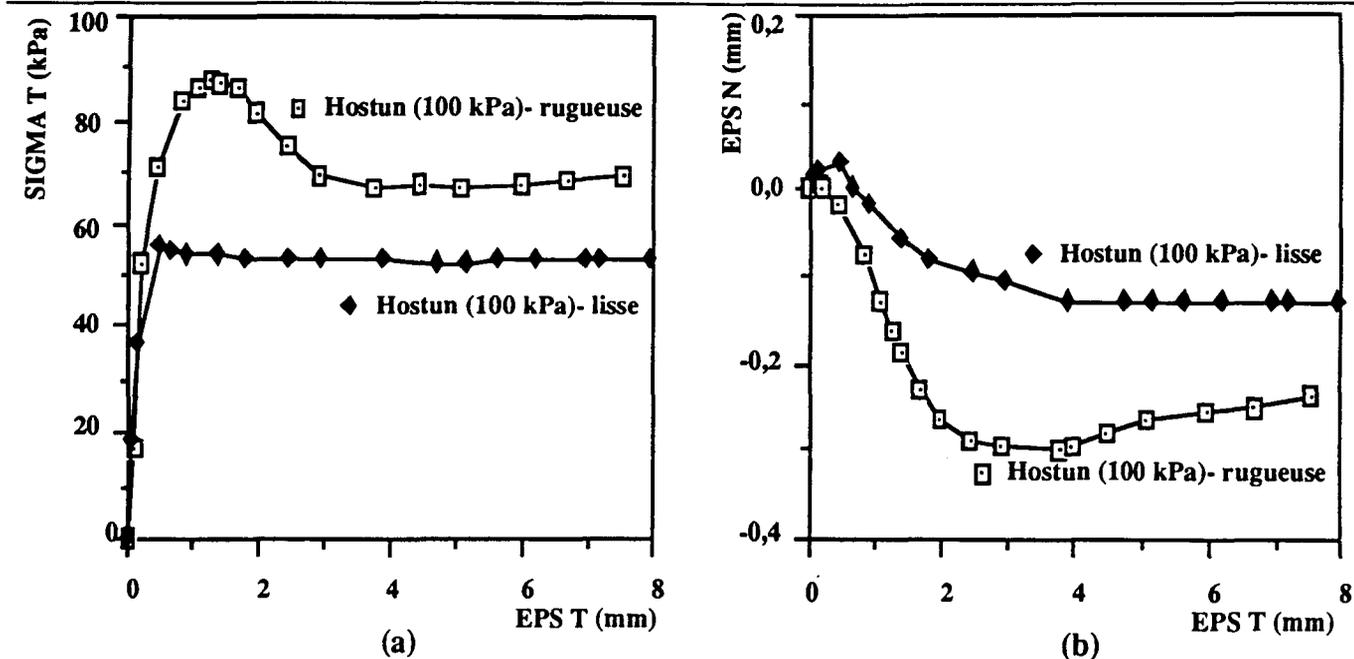


Figure : 2.16- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$)

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

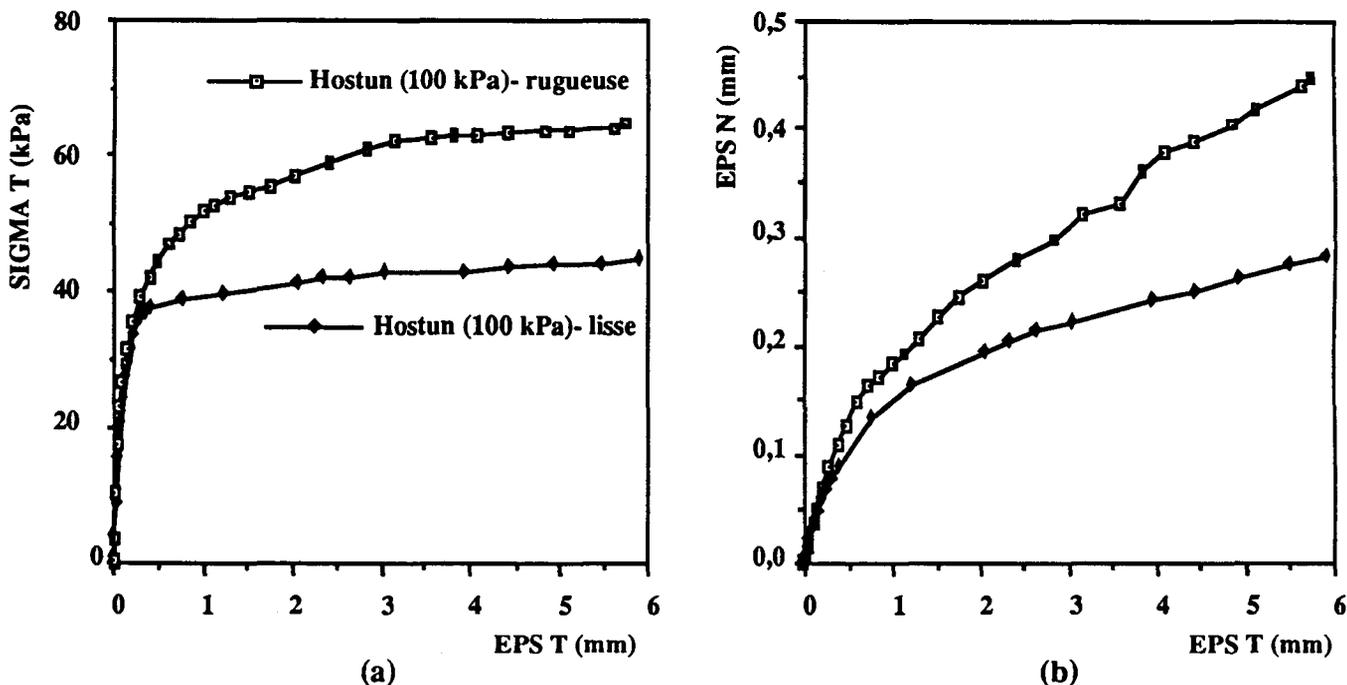


Figure : 2.17- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$)

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

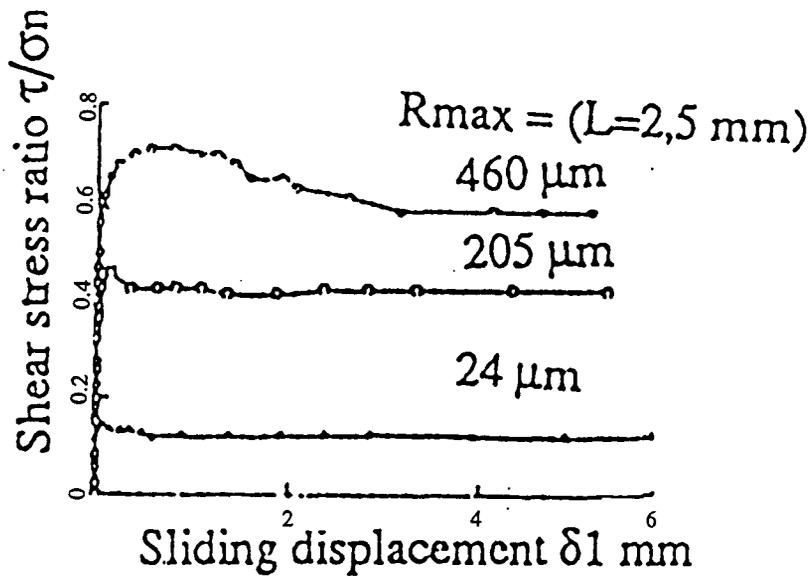


Figure : 2.18- Effet de la rugosité sur le comportement de l'interface. Essais de cisaillement simple. (D'après Kishida & Uesugi, 1987)

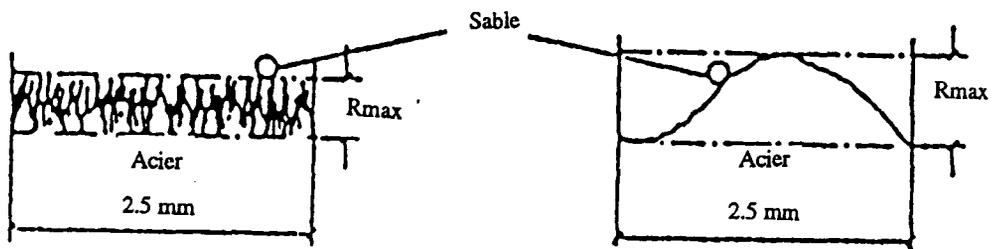


Figure : 2.19- Méthode de mesure de la rugosité d'une surface. (D'après Kishida & Uesugi, 1987)

$R_{max}(L)$ est définie par la hauteur relative entre le plus fort et plus faible pic sur une plaque de longueur L (Figure 2.19).

2.2. ESSAIS REALISES SUR LE SABLE QUIOU

Afin d'étudier l'influence du type de sable sur le comportement de l'interface sols-structures, une série d'essais a été réalisée avec le sable Quiou. Le programme expérimental mené avec ce sable est identique à celui réalisé avec le sable d'Hostun. L'influence des principaux paramètres a été examinée: contrainte initiale, densité du sable et rugosité de la surface.

2.2.1. Surface rugueuse

2.2.1.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

Des essais ont été effectués à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100, 200$ et 300 kPa).

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 2.20a et 2.20b. On constate que la contrainte de cisaillement augmente au début du chargement et atteint un pic pour un déplacement tangentiel de l'ordre de $3,5$ mm, après lequel, elle diminue pour se stabiliser à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 6 mm.

L'évolution du déplacement normal est illustrée dans la figure 2.20b. On constate que le comportement au début de l'essai est contractant, ensuite, il devient dilatant (pour un déplacement tangentiel de l'ordre de $1,1$ mm), puis il redevient contractant pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 5 mm. On note que la dilatance diminue avec l'amplification de la contrainte verticale.

Sable lâche

Des essais ont été réalisés à trois valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100, 200$ et 300 kPa).

On constate que la contrainte de cisaillement croît rapidement au début de chargement (jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 2 mm). Ensuite, elle continue à augmenter, mais modérément, sans atteindre de palier (Figure 2.21a).

En ce qui concerne le déplacement normal, (Figure 2.21b), on note que le comportement du sable est contractant tout au long de l'essai et on ne remarque pas de stabilisation de ce déplacement, même, en fin de chargement. On constate également que ce déplacement s'accroît avec la contrainte initiale.

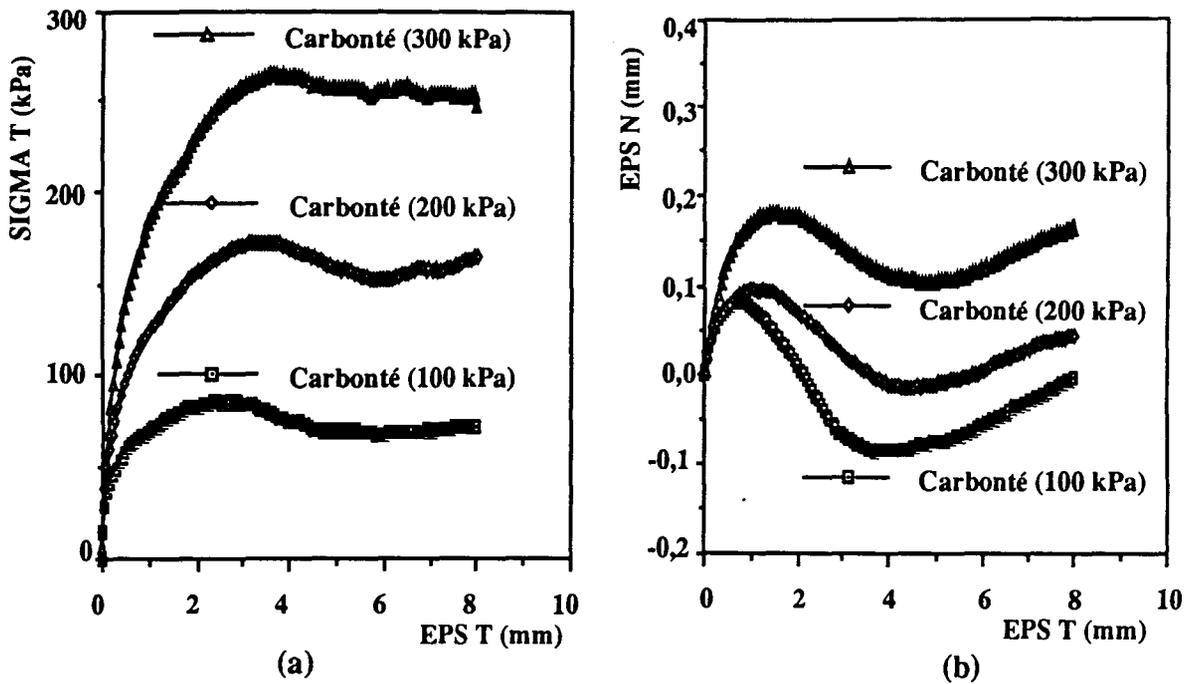


Figure : 2.20- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface rugueuse, sable CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

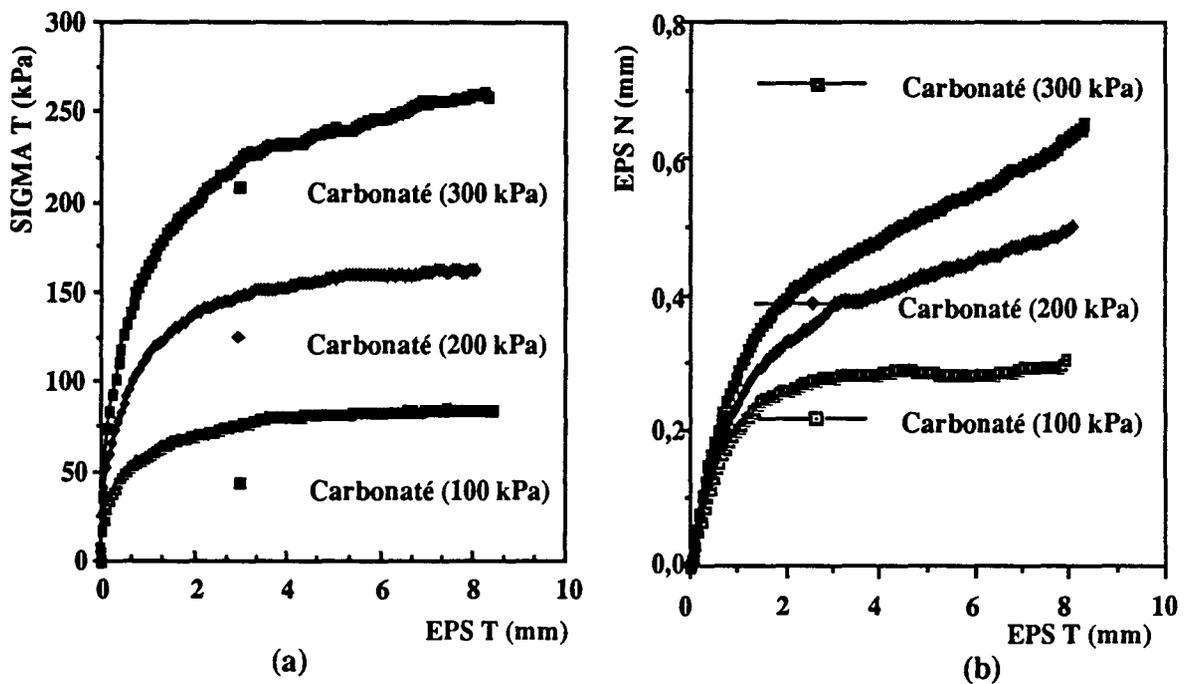


Figure : 2.21- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface rugueuse, sable CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

2.2.1.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Les résultats des deux essais à déplacement normal bloqué (σ_{n0} = 100 et 300 kPa) sont illustrés dans les figures 2.22a à 2.22d. On constate que la contrainte normale évolue au cours du cisaillement. Elle diminue en début de chargement, ensuite, elle subit une augmentation à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 0,8 mm, et enfin, elle diminue à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de 5 mm (Figure 2.22b). La figure 2.22d montre que l'évolution de la contrainte normale est bien corrélée avec celle du déplacement normal lors des essais à contrainte normale constante.

L'évolution de la contrainte de cisaillement est illustrée dans la figure 2.22a. On constate qu'elle augmente en début de chargement et atteint un pic pour un déplacement tangentiel de l'ordre de 5 mm, après lequel, elle diminue.

La figure 2.22c illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée. Elle croît rapidement en début de chargement, puis elle s'aligne sur une droite passant par l'origine et ayant une pente égale au coefficient de frottement au pic (c§. section 2.2.3.). A la fin de l'essai, on note une diminution des contraintes du cisaillement et normale en s'alignant sur une droite dont la pente est égale au coefficient de frottement limite.

Sable lâche

Les résultats de trois essais à déplacement normal bloqué (σ_{n0} = 100 , 200 et 300 kPa) sont illustrés dans les figures 2.23a à 2.23c. On constate que le comportement du sable est caractérisé par une diminution de la contrainte normale au cours de l'essai qui influence sensiblement l'évolution de la contrainte du cisaillement. Cette diminution est due au comportement contractant du sable. L'évolution de la contrainte normale lors de ces essais comporte trois phases (Figures 2.23a et 2.23b) :

- une première qui correspond à un déplacement tangentiel relatif compris entre 0 et 0,6 mm où la contrainte normale subit une forte diminution;
- une deuxième qui correspond à un déplacement tangentiel relatif compris entre 0,6 et 4 mm où les contraintes normale et de cisaillement tendent à se stabiliser;
- une troisième phase qui correspond à une diminution des contraintes normale et tangentielle.

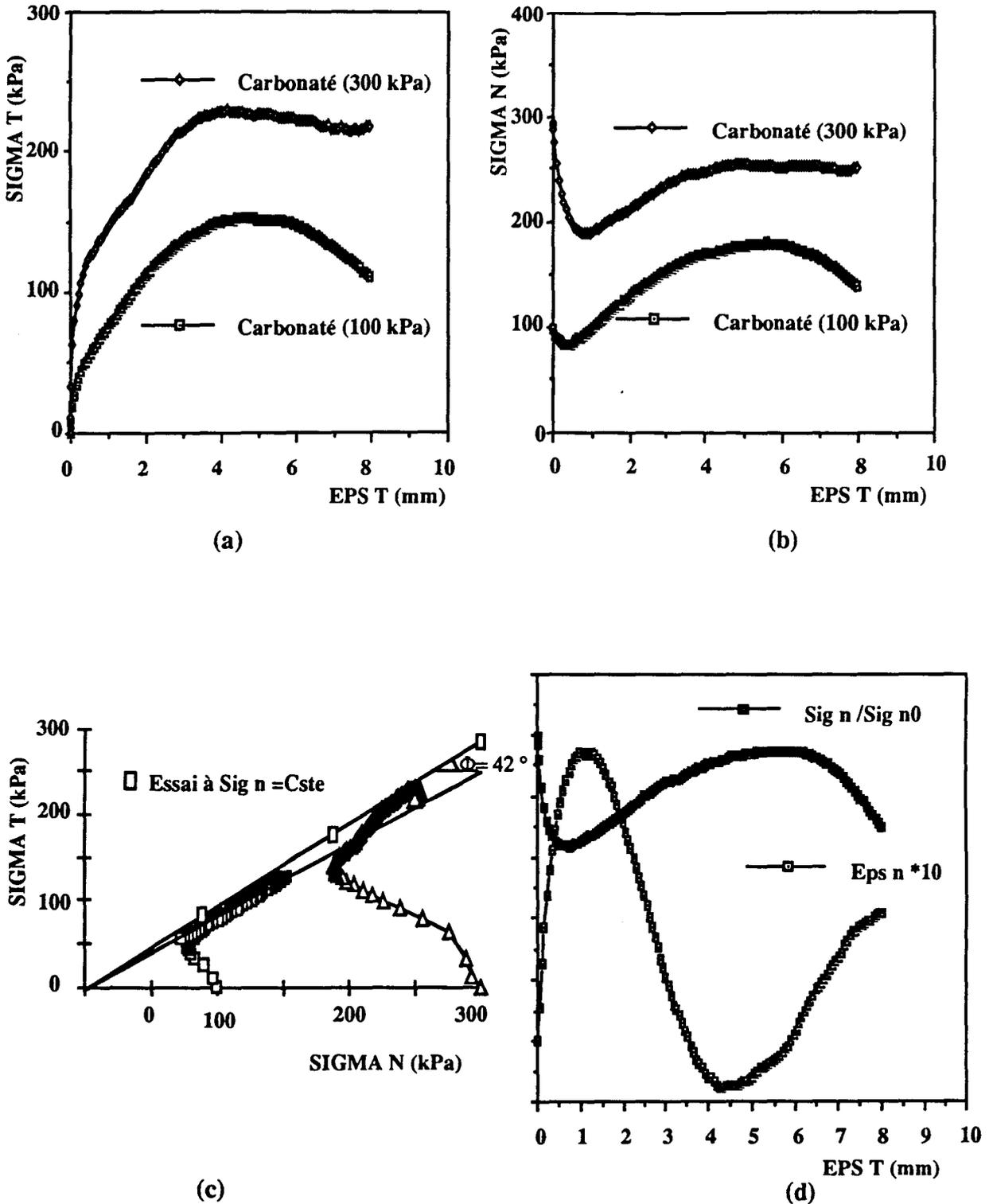


Figure : 2.22- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

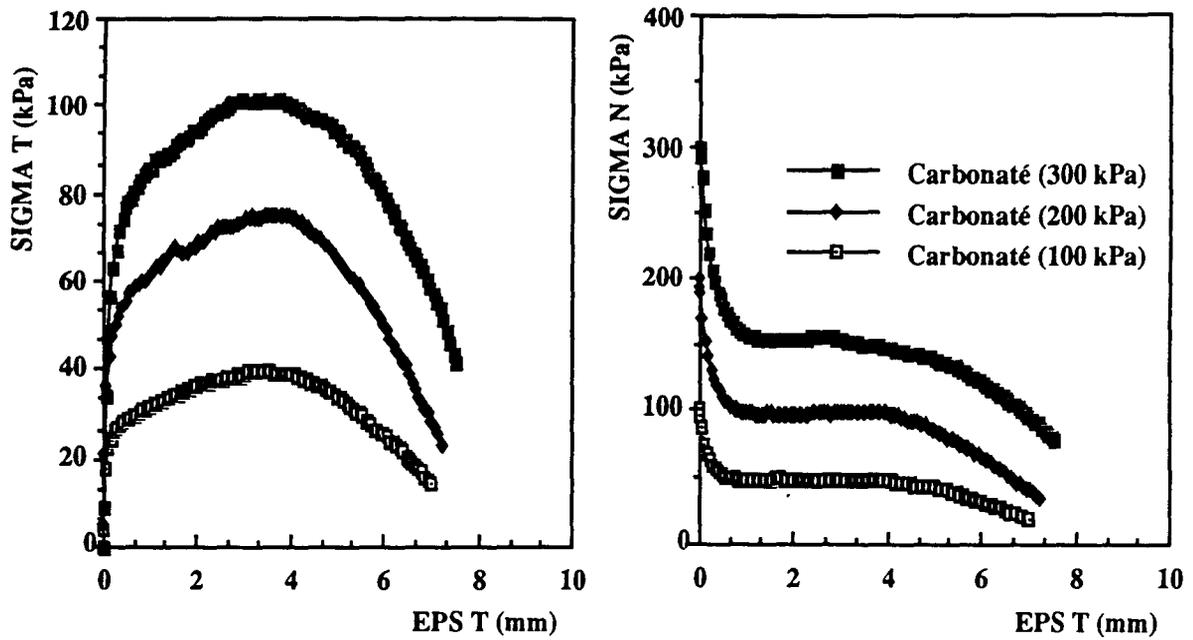
Surface rugueuse, sable CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution de la contrainte normale

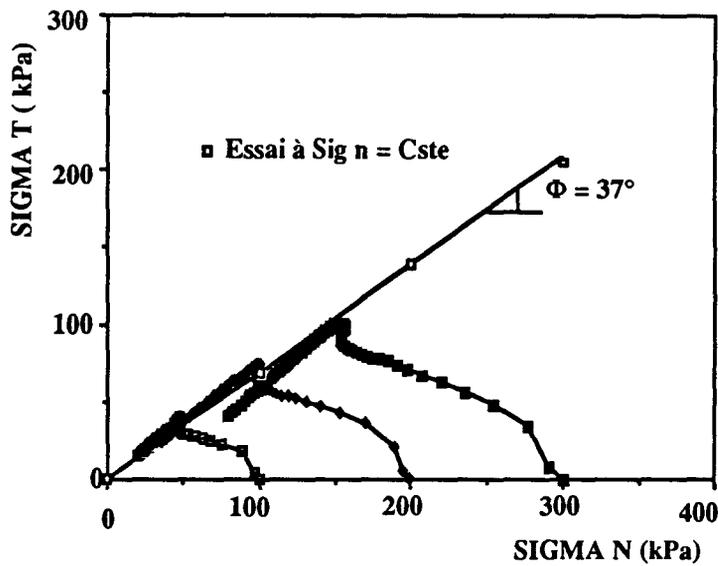
c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

d : Comparaison des essais à déplacement normal bloqué et à contrainte normale constante



(a)

(b)



(c)

Figure : 2.23- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface rugueuse, sable CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution de la contrainte normale

c: Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

La figure 2.23c montre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée. On constate que la contrainte de cisaillement croît jusqu'au pic, puis elle diminue en s'alignant sur une droite passant par l'origine et ayant une pente égale à l'angle de frottement ($c\phi$, section 2.2.3.).

2.2.2. Surface lisse

2.2.2.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

Nous avons effectué des essais avec le sable dense à deux valeurs de la contrainte verticale initiale ($\sigma_{n0} = 100$ et 300 kPa). Les résultats sont illustrés dans les figures 2.24a et 2.24b. On constate que la contrainte tangentielle croît au début du chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de $1,2$ mm. Ensuite, elle continue à augmenter mais modérément et sans atteindre de palier.

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que le comportement du sable est contractant tout au long de l'essai. On note également que le déplacement normal s'accroît avec la contrainte verticale initiale.

Sable lâche

Des essais ont été réalisés à trois valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0} = 100$, 200 et 300 kPa). Les résultats de ces essais sont illustrés dans les figures 2.25a et 2.25b. On constate que le comportement ressemble qualitativement à celui observé lors d'essais avec le sable dense. Cependant, on note que l'amplitude du déplacement normal est plus importante dans le cas du sable lâche.

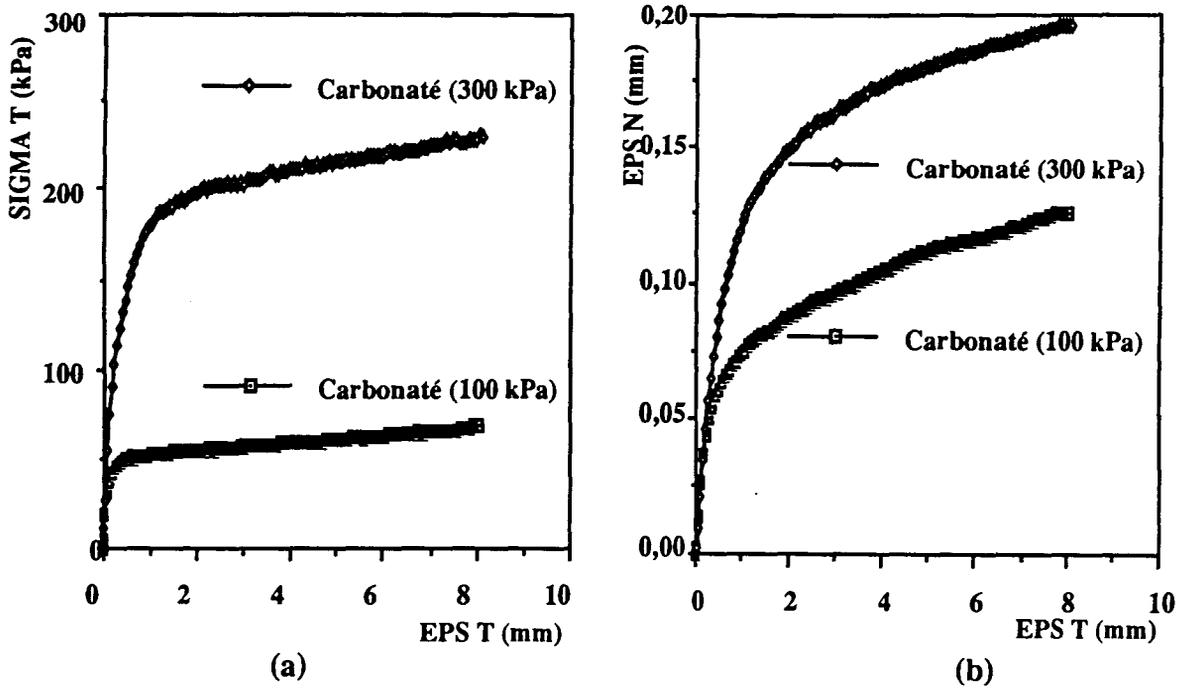


Figure : 2.24- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface lisse, sable CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)

a : Evolution de la contrainte tangentielle

b : Evolution du déplacement normal

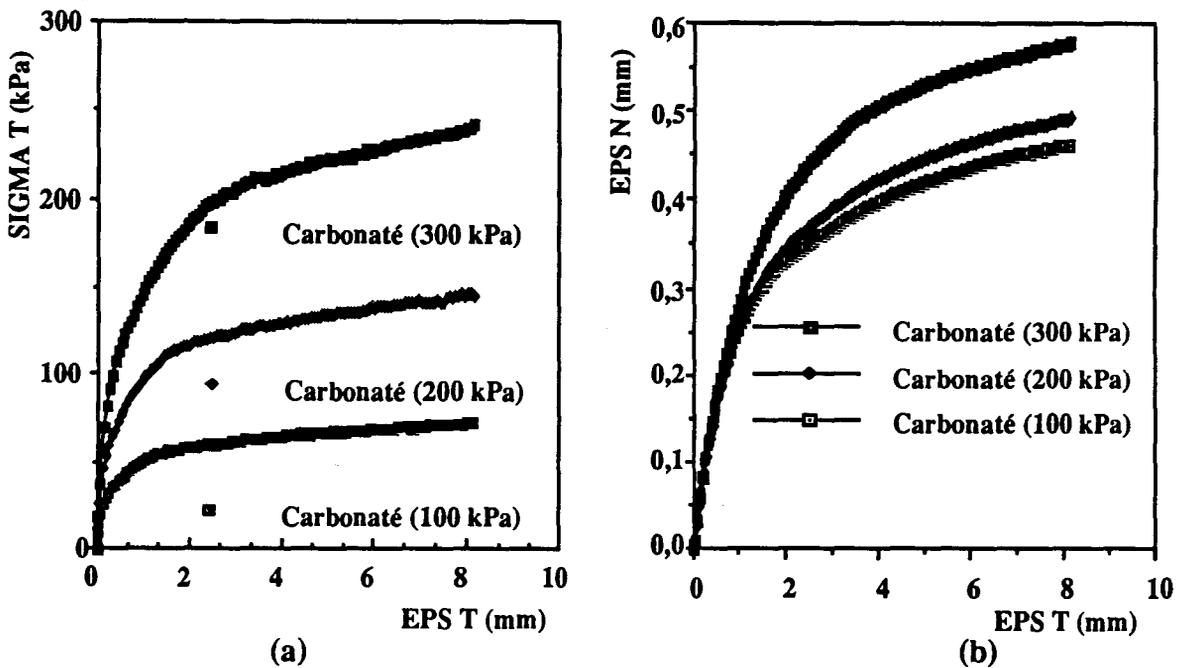


Figure : 2.25- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Surface lisse, sable CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)

a : Evolution de la contrainte tangentielle

b : Evolution du déplacement normal

2.2.2.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Des essais ont été réalisés sur le sable dense à deux valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=200$ et 300 kPa).

La figure 2.26b illustre l'évolution de la contrainte normale. On constate que celle-ci subit une forte diminution en début de chargement. Puis, elle se stabilise à partir d'un déplacement tangentiel de l'ordre de $1,2$ mm.

La figure 2.26a montre l'évolution de la contrainte de cisaillement. Elle croît rapidement en début de chargement jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de $0,7$ mm, puis elle continue à augmenter mais modérément et sans atteindre de palier.

La figure 2.26c illustre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale. On note que les contraintes finales s'alignent sur une droite dont la pente est égale au coefficient de frottement.

Sable lâche

Des essais ont été réalisés avec le sable lâche à différentes valeurs de la contrainte normale initiale ($\sigma_{n0}=100$, 200 et 300 kPa). On constate que la contrainte normale chute rapidement au début de chargement, ensuite, elle se stabilise. Compte tenu du comportement contractant de ce sable, cette diminution est plus forte que celle observée avec le sable dense.

La figure 2.27c montre les chemins de contraintes parcourus dans le plan (σ_n, τ). On peut constater que les contraintes finales s'alignent sur une droite dont la pente est égale au coefficient de l'angle de frottement (de l'ordre de 28°).

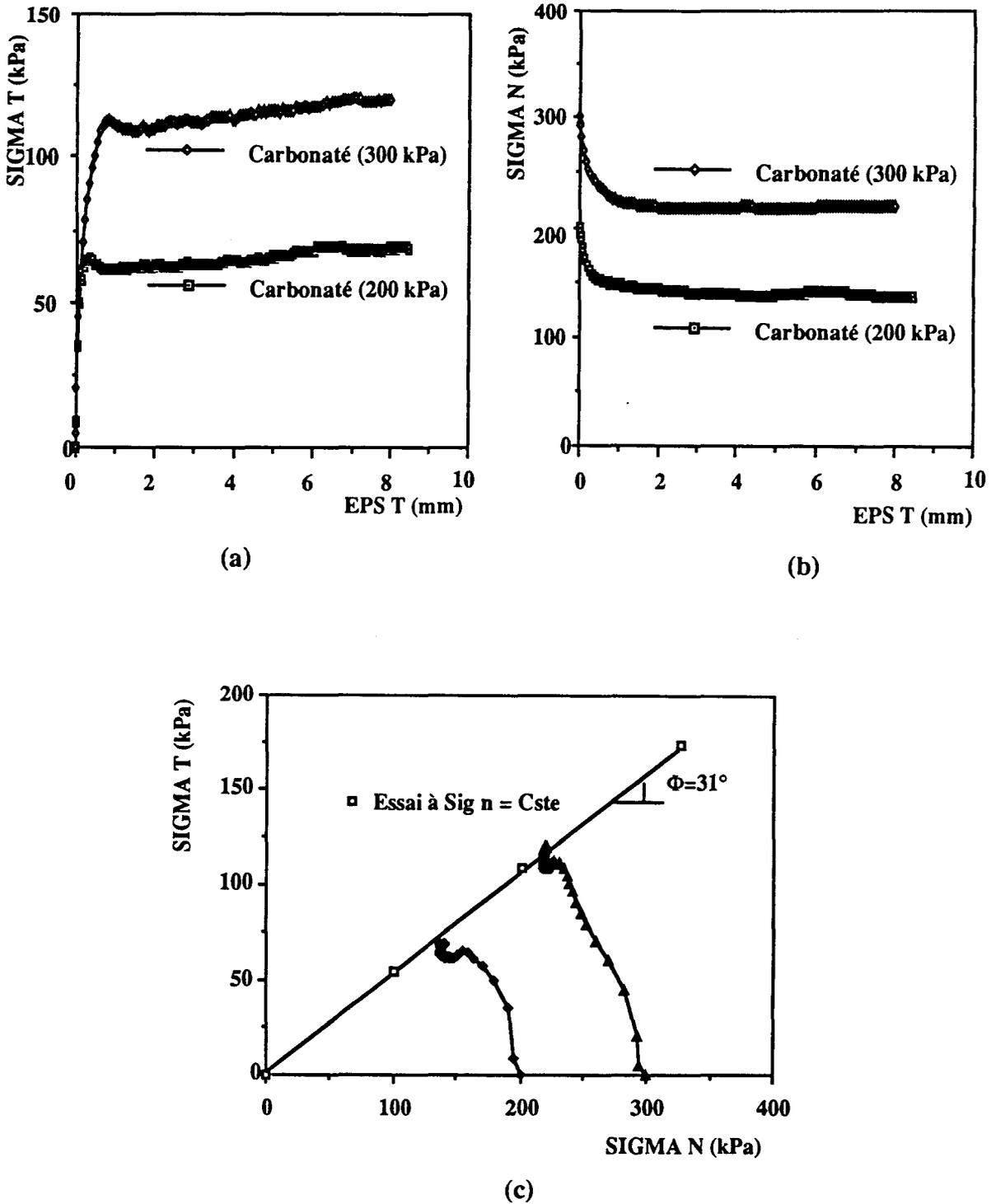


Figure : 2.26- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface lisse, sable CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution de la contrainte normale

c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

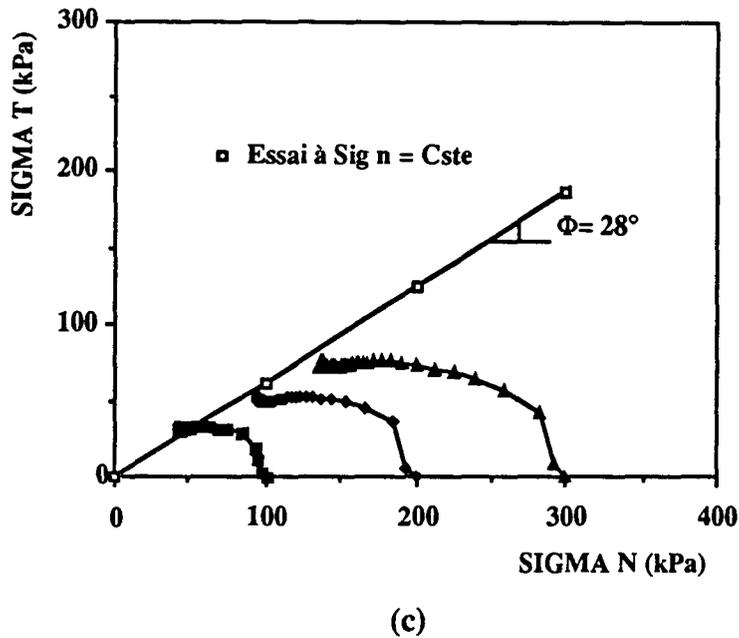
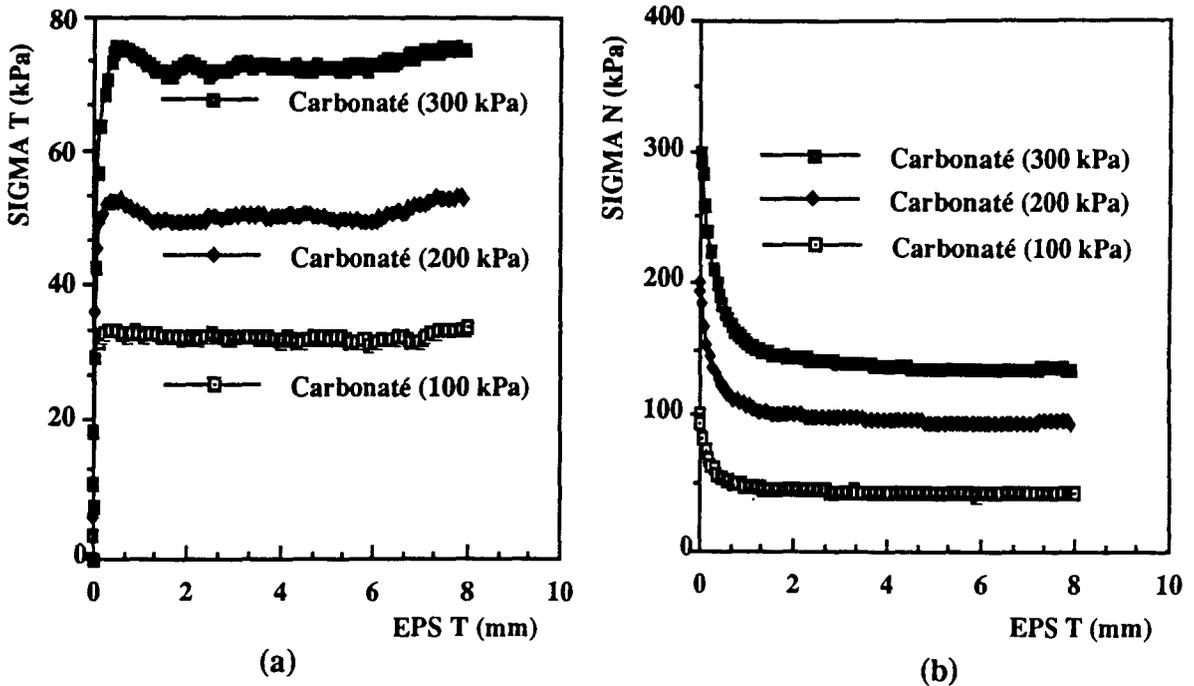


Figure : 2.27- Essais de cisaillement à déplacement normal bloqué

Surface lisse, sable CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution de la contrainte normale

c : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale

2.2.3. Etude des angles de frottement et de dilatance

Les figures 2.28 et 2.29 illustrent l'influence des propriétés d'interface et de la contrainte verticale sur l'angle de frottement. Une analyse de ces résultats montre que:

-L'angle de frottement décroît avec le confinement. Il diminue de 2° pour le sable lâche et de $1,5^\circ$ pour le sable dense lorsque la contrainte verticale croît de 100 à 300 kPa.

-L'angle de frottement pour l'interface rugueuse est plus élevé que celui de l'interface à surface lisse.

La figure 2.30 illustre l'évolution de l'angle de dilatance en fonction de la contrainte normale initiale pour le sable dense. On constate que l'angle de dilatance diminue avec la contrainte de confinement. La valeur moyenne de cet angle est de l'ordre de $4,5^\circ$ pour l'interface rugueuse.

2.2.4. Effet de la rugosité et de la densité initiale

Afin d'illustrer l'influence de la rugosité de la surface d'interface et de la densité initiale du sable Quiou sur le comportement mécanique de l'interface, nous avons tracé les résultats des essais à contrainte normale constante réalisés avec les deux rugosités et les deux densités (Figures 2.31a à 2.34b).

Densité initiale

Les résultats de ces essais montrent que le comportement de l'interface est très influencé par la densité initiale. Dans le cas d'une surface rugueuse, on note que le sable dense présente une phase de dilatance et un radoucissement alors que le sable lâche est contractant tout au long de l'essai et ne présente pas de radoucissement (Figures 2.31a et 2.31b).

Dans le cas d'une surface lisse (Figures 2.32a et 2.32b), la densité du sable affecte d'une manière moins sensible l'évolution du cisaillement. On note un comportement contractant pour les sables dense et lâche avec cependant une amplification du déplacement normal dans le cas du sable lâche.

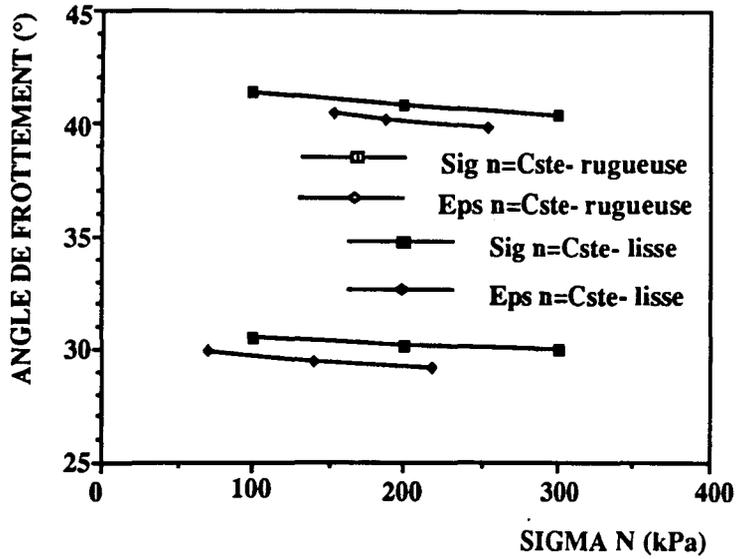


Figure : 2.28- Evolution de l'angle de frottement
Sable carbonaté dense ($D_r=90\%$)

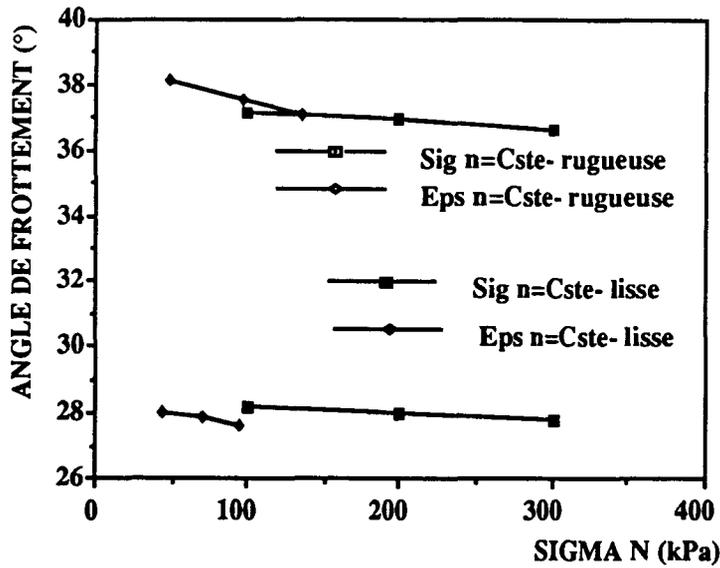


Figure : 2.29- Evolution de l'angle de frottement mesuré d'un déplacement tangentiel de 5mm. Sable carbonaté lâche ($D_r=15\%$)

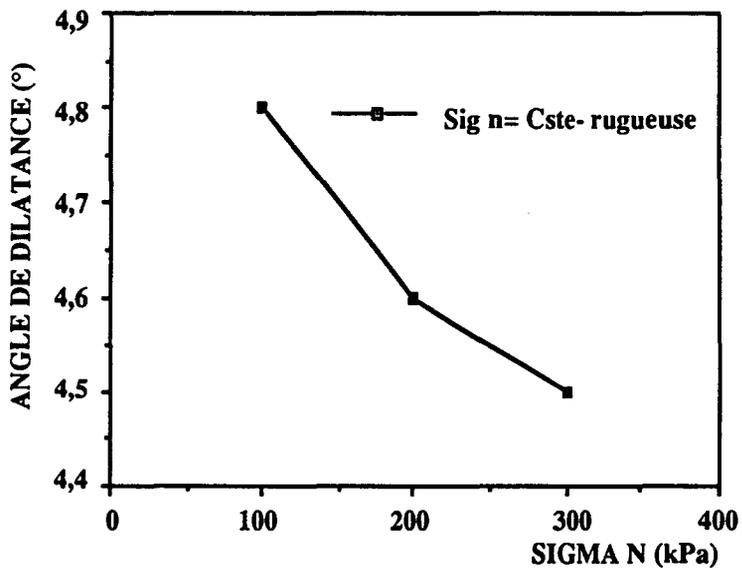


Figure : 2.30- Evolution de l'angle de dilatance
Sable carbonaté dense ($D_r=90\%$)

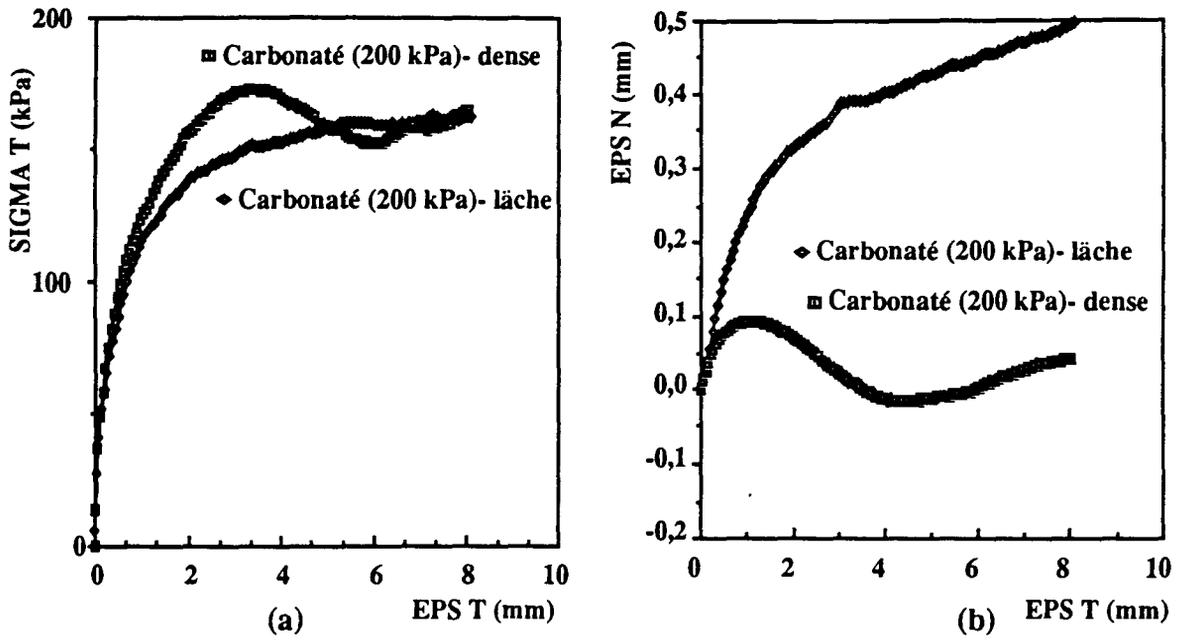


Figure : 2.31- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, sable CARBONATE, surface rugueuse

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

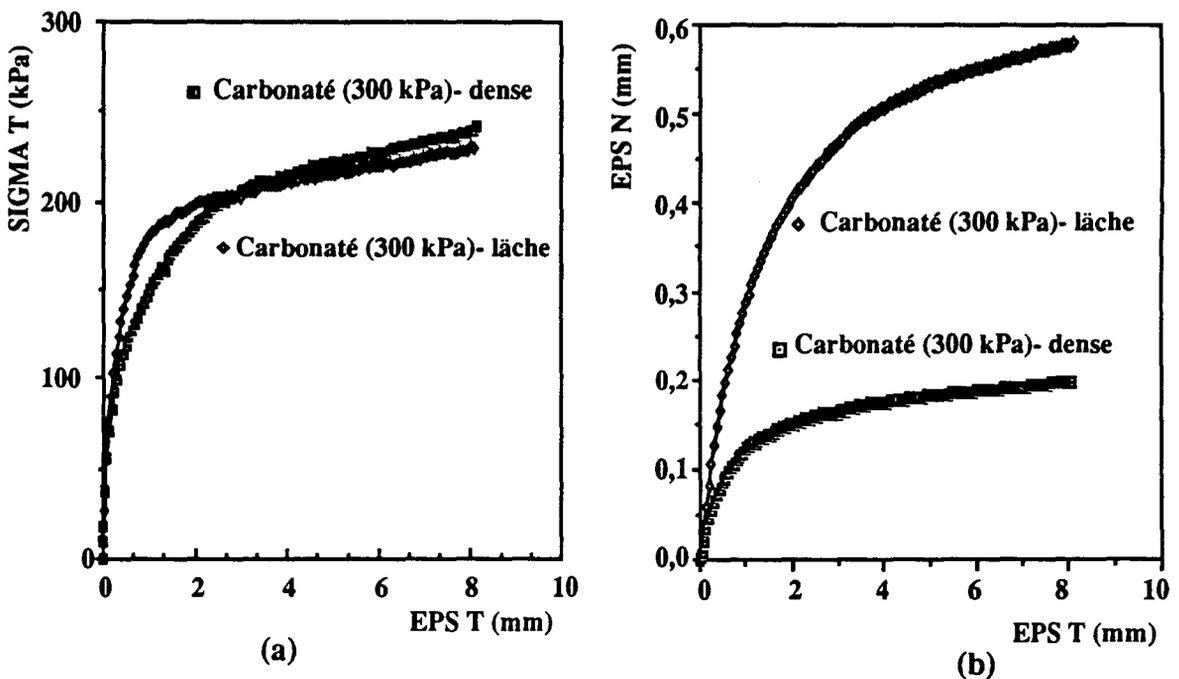


Figure : 2.32- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, sable CARBONATE, surface lisse

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

Rugosité

Les figures 2.33a et 2.33b illustrent l'influence de la rugosité sur le comportement de l'interface avec le sable dense. On note que l'interface à surface rugueuse présente une phase de dilatance et un radoucissement qui ne sont pas observés avec l'interface lisse. L'angle de frottement avec une surface rugueuse est sensiblement plus fort que celui obtenu avec une surface lisse.

L'influence de la rugosité dans le cas d'un sable lâche est faible. Les résultats de ces essais (Figures 2.34a et 2.34b) montrent que les deux sables ne présentent de radoucissement et que le comportement est contractant tout au long de l'essai. On note également que l'angle de frottement avec une surface lisse est plus faible qu'avec une surface rugueuse.

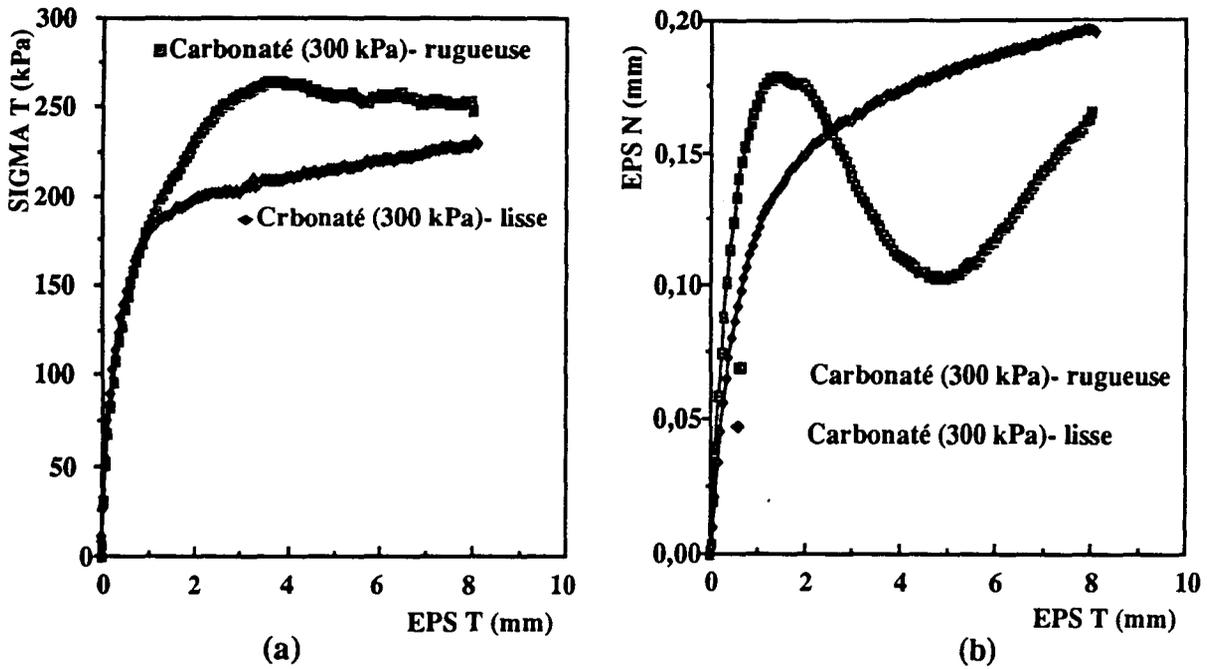


Figure : 2.33- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

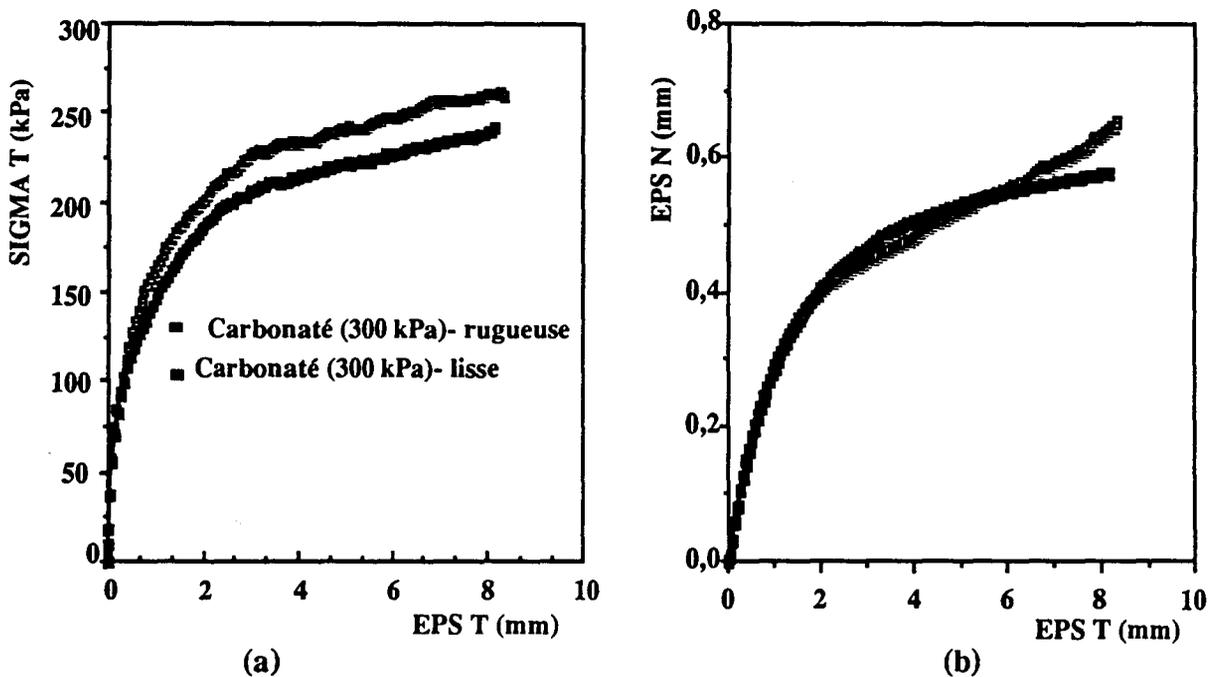


Figure : 2.34- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)

a: Evolution de la contrainte tangentielle

b: Evolution du déplacement normal

2.3. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES SABLES D'HOSTUN ET QUIOU

Le sable d'Hostun est un sable quartzeux, homogène avec des grains lisses, solides et résistants à la rupture alors que le sable de Quiou est un sable calcaire avec des grains anguleux, non-homogènes et une forte quantité de carbonate de calcium et par conséquent faible et moins résistant à la rupture. Les figures 2.35a à 2.38b illustrent une comparaison entre les résultats obtenus avec ces deux sables.

Une analyse de ces résultats montre que la résistance au cisaillement avec le sable carbonaté est, dans l'ensemble, plus forte que celle mesurée avec le sable d'Hostun. Le radoucissement observé avec le sable carbonaté est moins accentué que celui observé avec le sable d'Hostun.

En ce qui concerne le déplacement normal, l'interface avec le sable carbonaté a un comportement qui est, dans l'ensemble, contractant à l'exception de l'interface rugueuse avec le sable dense, alors que le sable d'Hostun montre une phase de dilatance plus prononcée dans le cas d'une densité forte. Le déplacement contractant obtenu avec le sable carbonaté est, dans l'ensemble, plus fort que celui mesuré avec le sable d'Hostun.

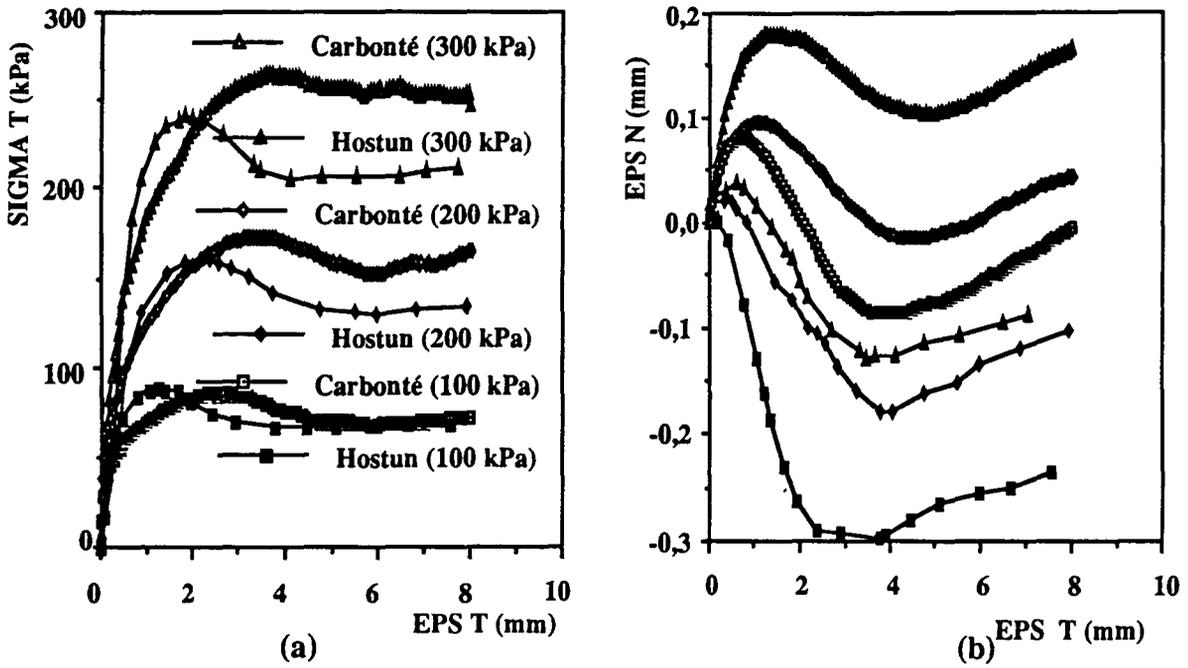


Figure : 2.35- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Sables d'HOSTUN et CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)
Surface rugueuse

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

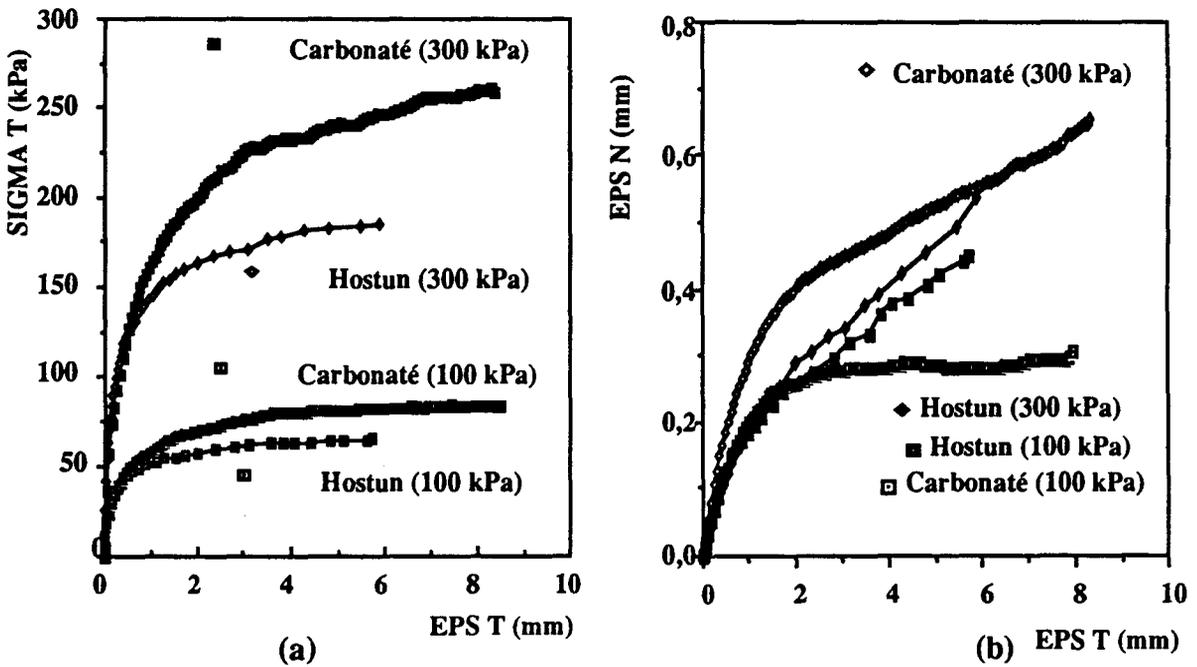


Figure : 2.36- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Sables d'HOSTUN et CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)
Surface rugueuse

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

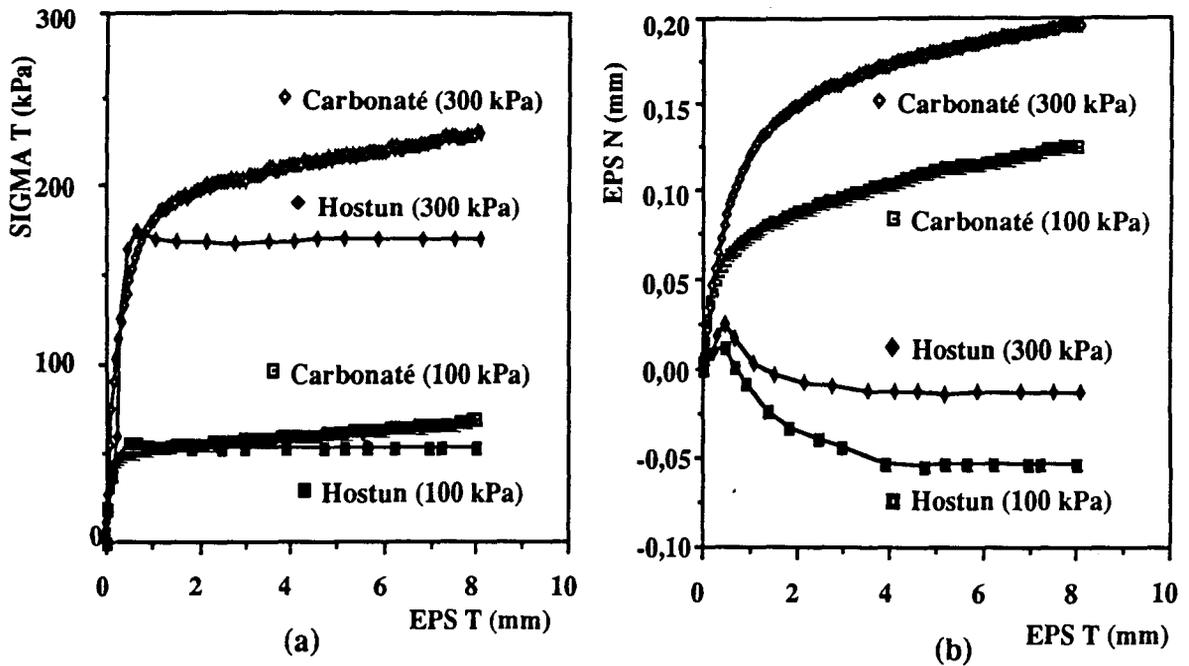


Figure : 2.37- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Sables d'HOSTUN et CARBONATE dense ($D_r = 90\%$)
 Surface lisse

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

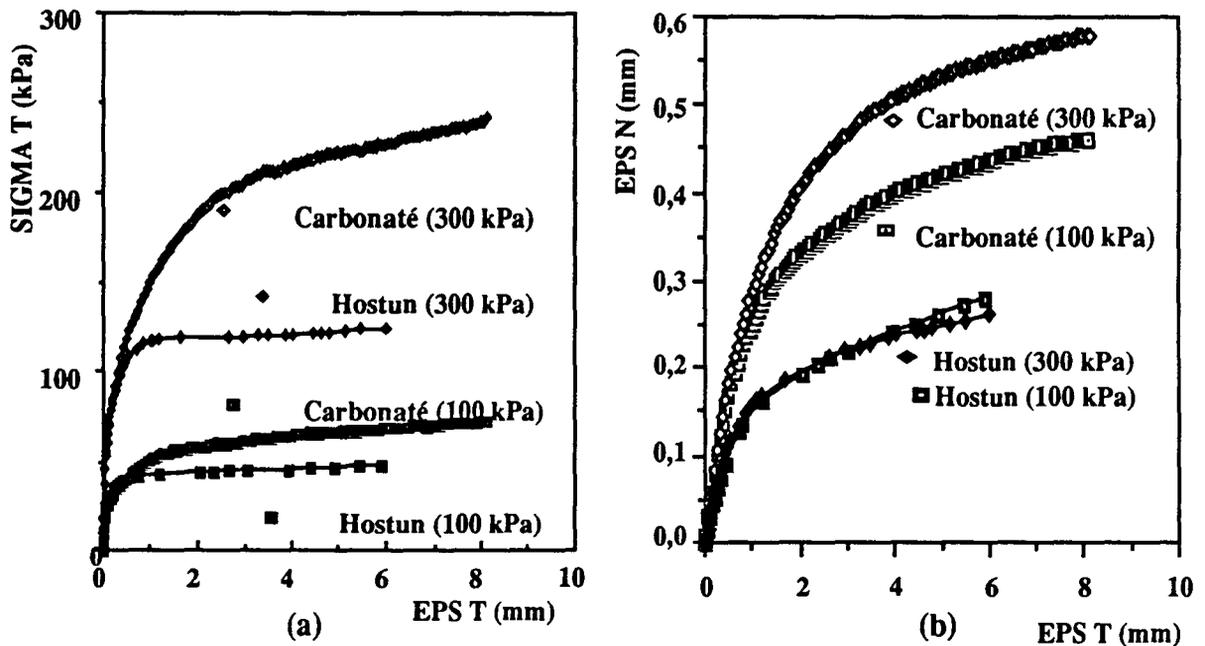


Figure : 2.38- Essais de cisaillement à contrainte normale constante

Sables d'HOSTUN et CARBONATE lâche ($D_r = 15\%$)
 Surface lisse

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

CHAPITRE : 3

**ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT
CYCLIQUE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES**

.....

CHAPITRE 3 :

ETUDE EN LABORATOIRE DU COMPORTEMENT CYCLIQUE DE L'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais cycliques d'interface qui ont été réalisés avec le sable d'Hostun et un sable carbonaté. Dans le programme expérimental, nous avons étudié l'influence sur le comportement de l'interface des paramètres suivants:

- la rugosité de l'interface ;*
- la densité initiale du sable ;*
- la condition de chargement dans la direction verticale ;*
- la forme et le niveau de cycles de chargement.*

Dans ce chapitre, un déplacement normal contractant est supposé négatif.

3.1. ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE D'HOSTUN

Le comportement cyclique de l'interface a été étudié sur des chemins à contrainte normale constante et à déplacement normal bloqué 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.

3.1.1. Surface rugueuse

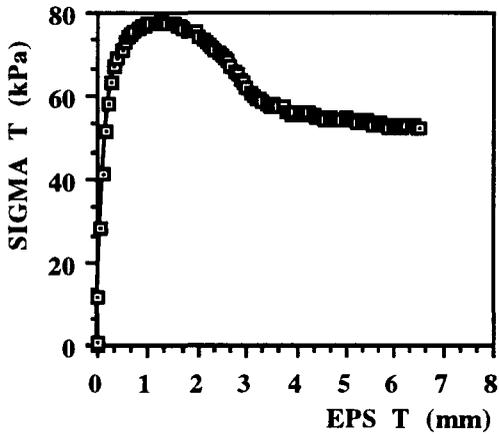
Afin d'illustrer les niveaux de chargement cyclique retenus, nous donnons dans les figures 3.1a à 3.1d les résultats des essais monotones réalisés avec cette interface.

3.1.1.1. Essais à contrainte normale constante

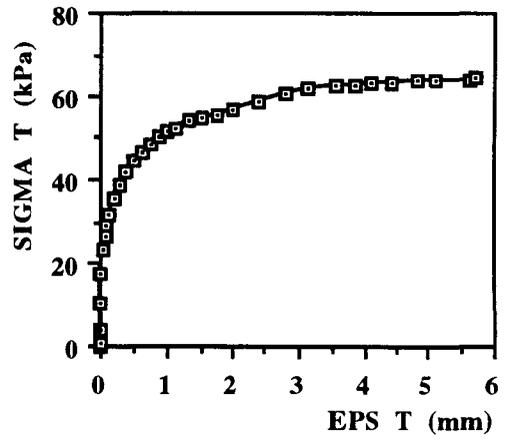
Sable dense

Essais cycliques en déplacement tangentiel contrôlé ($\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$)

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.

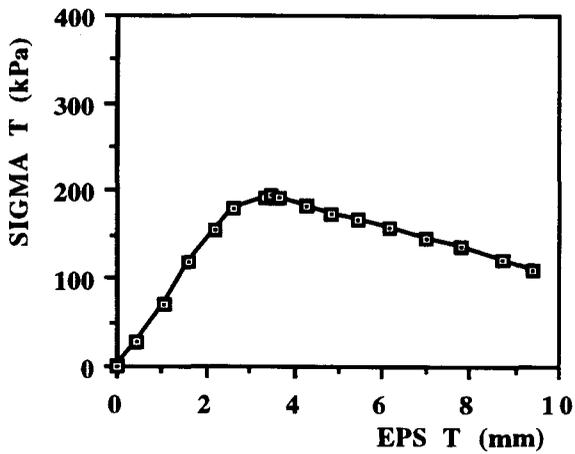


Sable dense

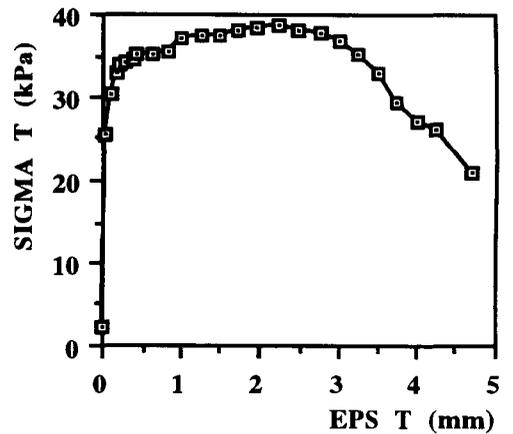


Sable lâche

Essais à contrainte normale constante



Sable dense



Sable lâche

Essais à déplacement normal bloqué

Figure : 3.1 - Résultats des essais monotones d'interface.
(Surface rugueuse, sable d'Hostun)

Le premier essai a été réalisé avec un chargement alterné dans le domaine post-pic ($-2 \text{ mm} \leq \gamma \leq +2 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 3.2a à 3.2f. On remarque que le chargement cyclique induit une diminution de la contrainte de cisaillement maximale mobilisée au cours des cycles. Après 18 cycles, la diminution de la contrainte de cisaillement maximale est de l'ordre de 6 kPa, soit 7% par rapport à la contrainte mobilisée lors du chargement monotone (Figure 3.2c). Ceci traduit un phénomène d'adoucissement cyclique. On note que les boucles d'hystérésis contrainte-déformation se ferment légèrement à partir du deuxième cycle.

Des essais cycliques réalisés par Desai (1985) et Youd et Budhu (1985) sur des sables denses ont mis en évidence ce phénomène de radoucissement cyclique (Figures 3.3a et 3.3b).

En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que les cycles de chargement comportent une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance. On note que le comportement est globalement contractant. Après 18 cycles de chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 3,2 mm. On note également que l'amplitude du déplacement normal cumulé par cycle diminue avec le nombre de cycles (Figures 3.2b et 3.2d).

A chaque inversion du chargement, on note un comportement contractant de l'interface qui traduit un réarrangement et serrage de grains dans la zone de l'interface. Ce phénomène est différent de celui observé sur le sable qui manifeste un comportement dilatant lors d'un déchargement (Figure 3.4b).

Afin de confirmer ce phénomène, nous avons réalisé trois essais cycliques avec une amplitude croissante (Figures 3.5.1 à 3.5.3). Le premier essai a été réalisé dans le domaine contractant, le second a été réalisé au début de la phase de dilatance, quant au dernier, il a été réalisé pour un niveau élevé de dilatance. Les résultats obtenus montrent que pour les trois essais, le comportement à chaque inversion du chargement est contractant ce qui confirme les résultats de l'essai précédant et montre une différence importante par rapport au comportement du sable. Ce phénomène, qui a été observé à la boîte de cisaillement simple par Budhu (1985), peut être attribué par la tendance du matériau à réarranger les grains avec un serrage à chaque inversion de la direction du chargement.

Les résultats d'un deuxième essai alterné à une amplitude plus faible ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.6a à 3.6f. On constate que la contrainte de cisaillement mobilisée diminue au cours du chargement. Ceci traduit, comme pour l'essai précédant, un adoucissement cyclique de l'interface.

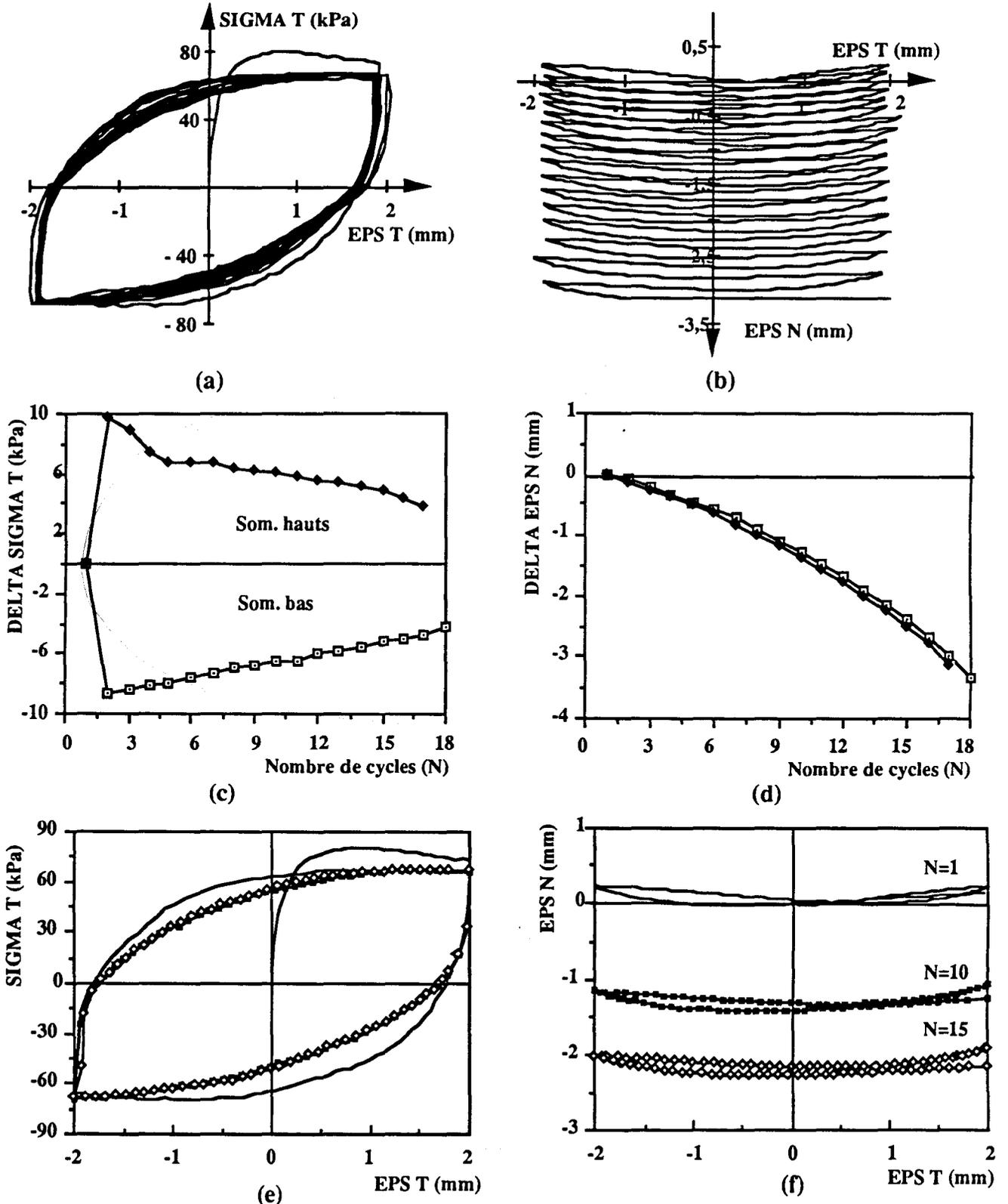


Figure : 3.2- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-2 \text{ mm} \leq \gamma \leq +2 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ε_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ε_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ε_n aux cycles: 1, 10 et 15)

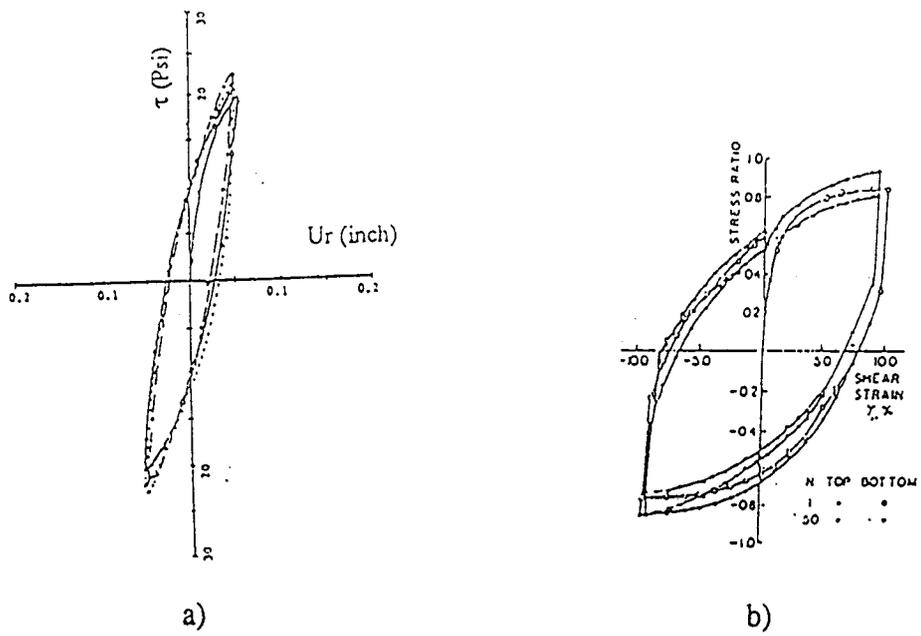
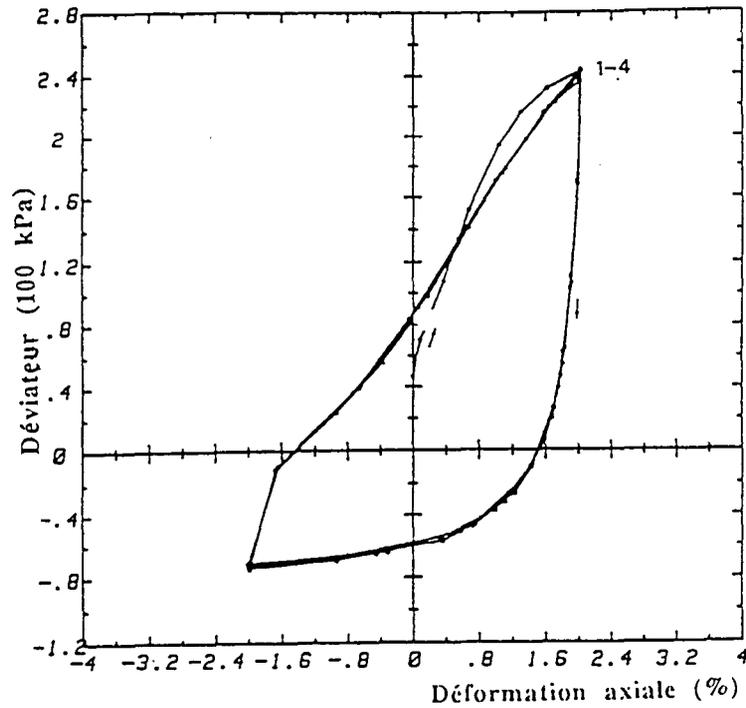
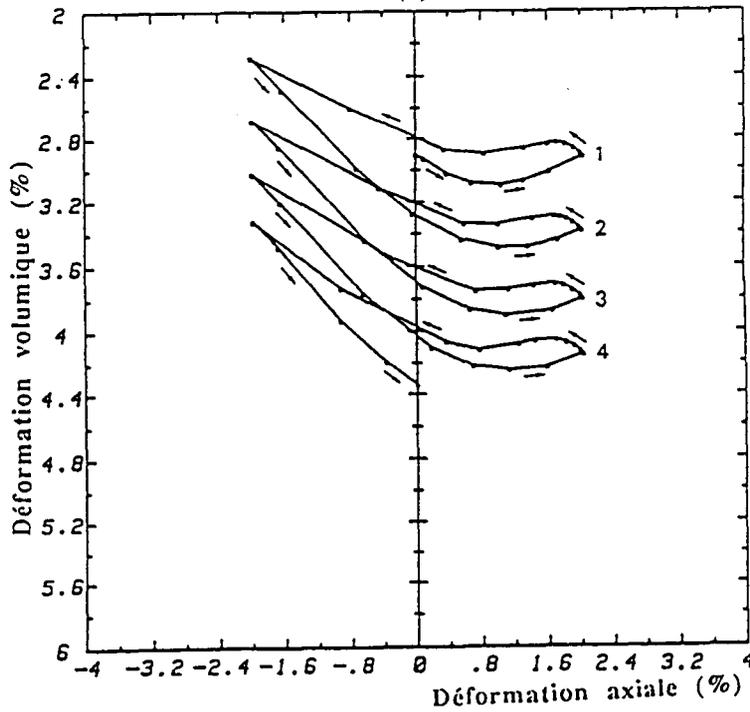


Figure : 3.3 - Essais cycliques sur l'interface.

- a) Desai et al (1985) sur sable dense d'Ottawa
- b) Youd et Budhu (1985) sur sable dense de Leighton Buzzard



(a)



(b)

Figure : 3.4 - Essai triaxial cyclique drainé à déformation contrôlée sur le sable lâche d'Hostun ($P_c = 100$ kPa) (Mohkam, 1983)

- a)- Evolution du déviateur
- b)- Evolution de la déformation volumique

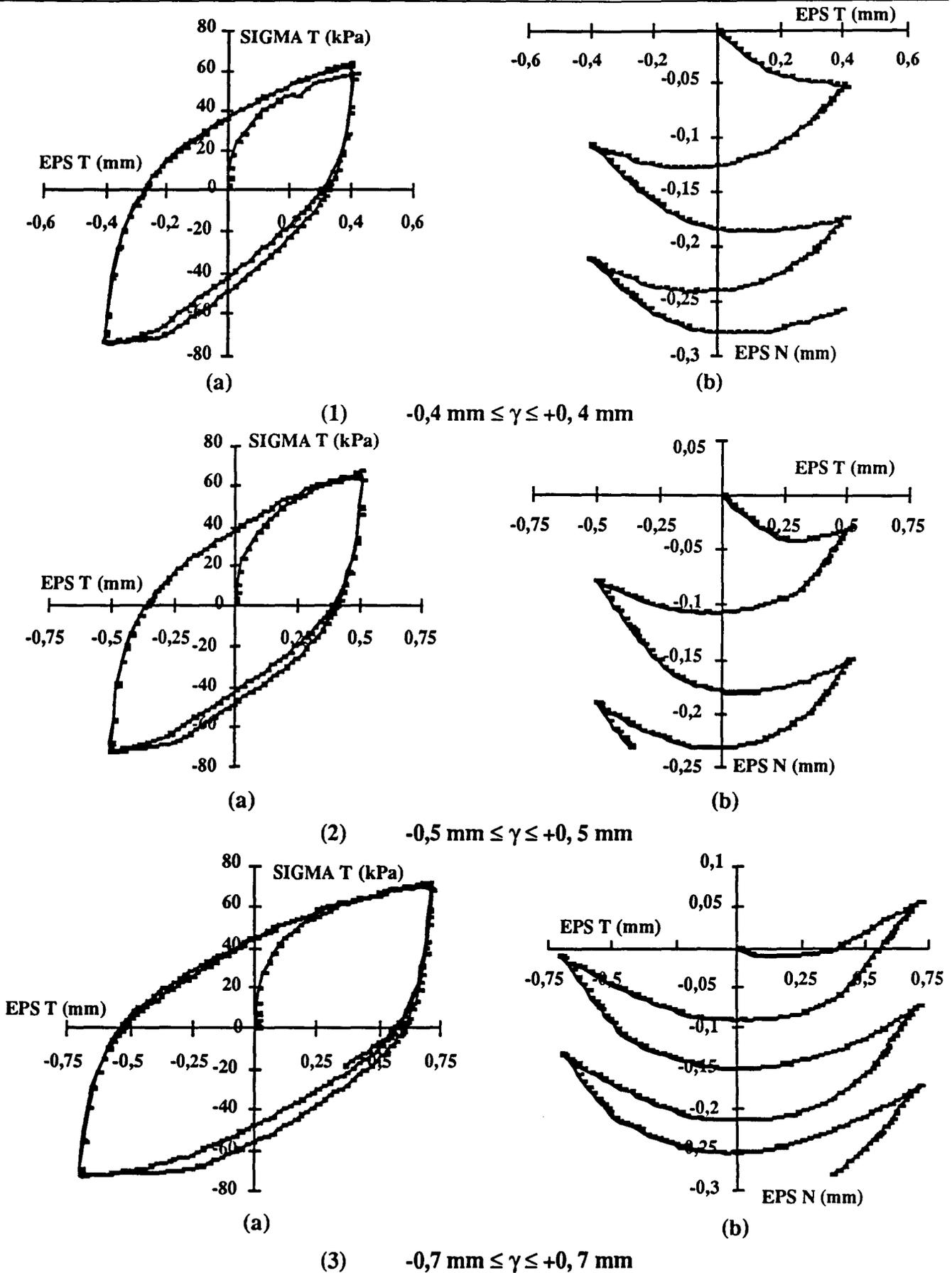


Figure : 3.5- Essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, essais à γ imposée
Sable d'HOSTUN, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a: Evolution de τ aux cours des cycles)

(b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles)

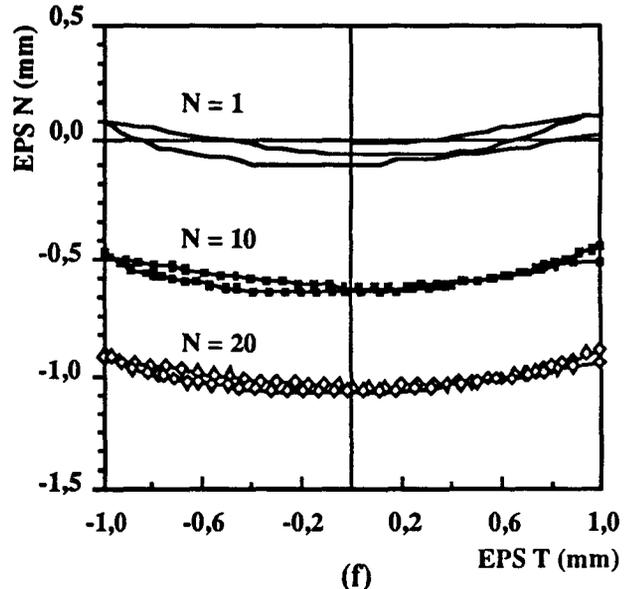
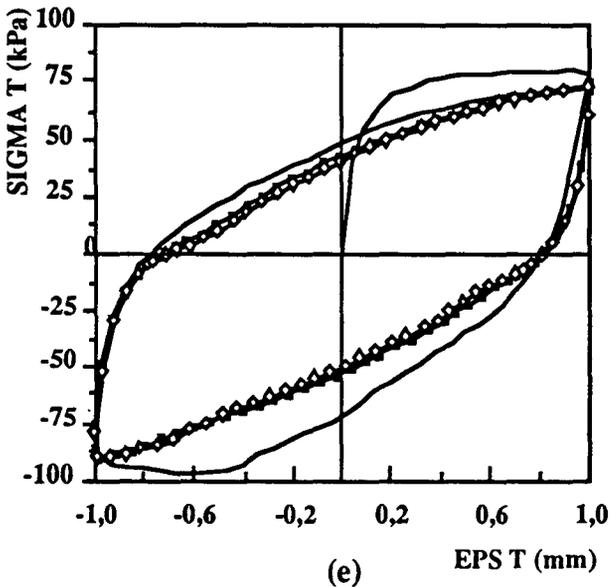
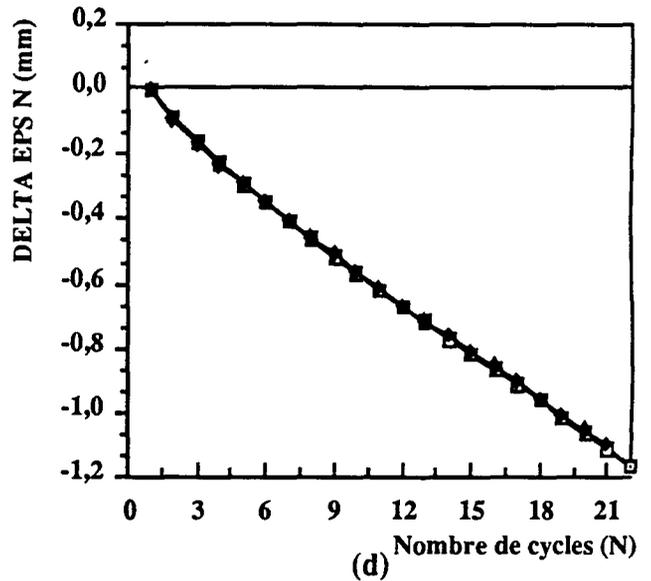
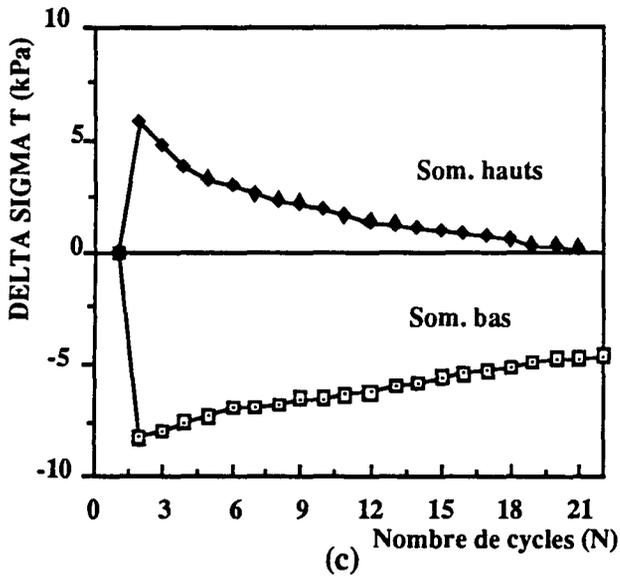
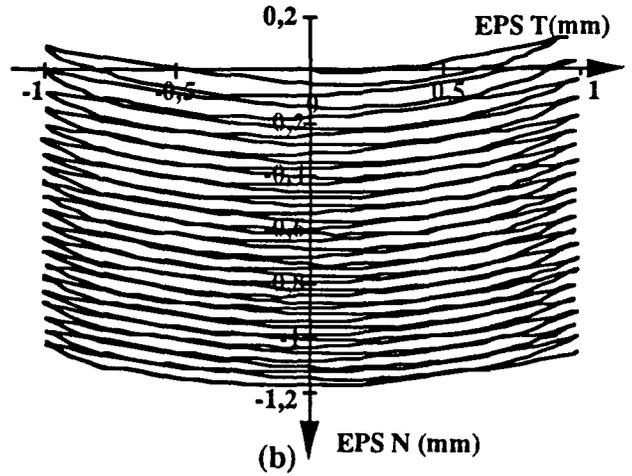
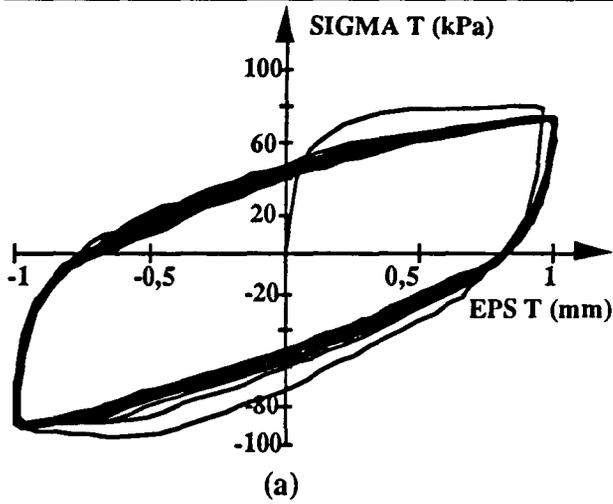


Figure : 3.6- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

Une comparaison des deux essais cycliques alternés ($-2 \text{ mm} \leq \gamma \leq +2 \text{ mm}$) et ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) montre que l'érouissage cyclique s'amplifie avec l'amplitude de chargement. On note également que l'amplitude des cycles affecte l'évolution du déplacement normal. Ceci se traduit par une amplification du déplacement normal contractant cumulé avec l'amplitude des cycles de chargement. Le déplacement normal cumulé est de 3,2 mm (resp. 1,2 mm) pour l'essai réalisé à une amplitude de 2 mm (resp. 1 mm).

Afin d'étudier le comportement cyclique dans le domaine pré-pic, nous avons réalisé un essai cyclique ondulatoire ($0 \text{ mm} \leq \gamma \leq +0,75 \text{ mm}$). Les résultats de cet essai sont illustrés dans les figures 3.7a à 3.7e. On constate que le chargement cyclique induit un érouissage positif. La contrainte de cisaillement au sommet augmente de 5 kPa au bout de 20 cycles ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 4% 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 0,8 mm.

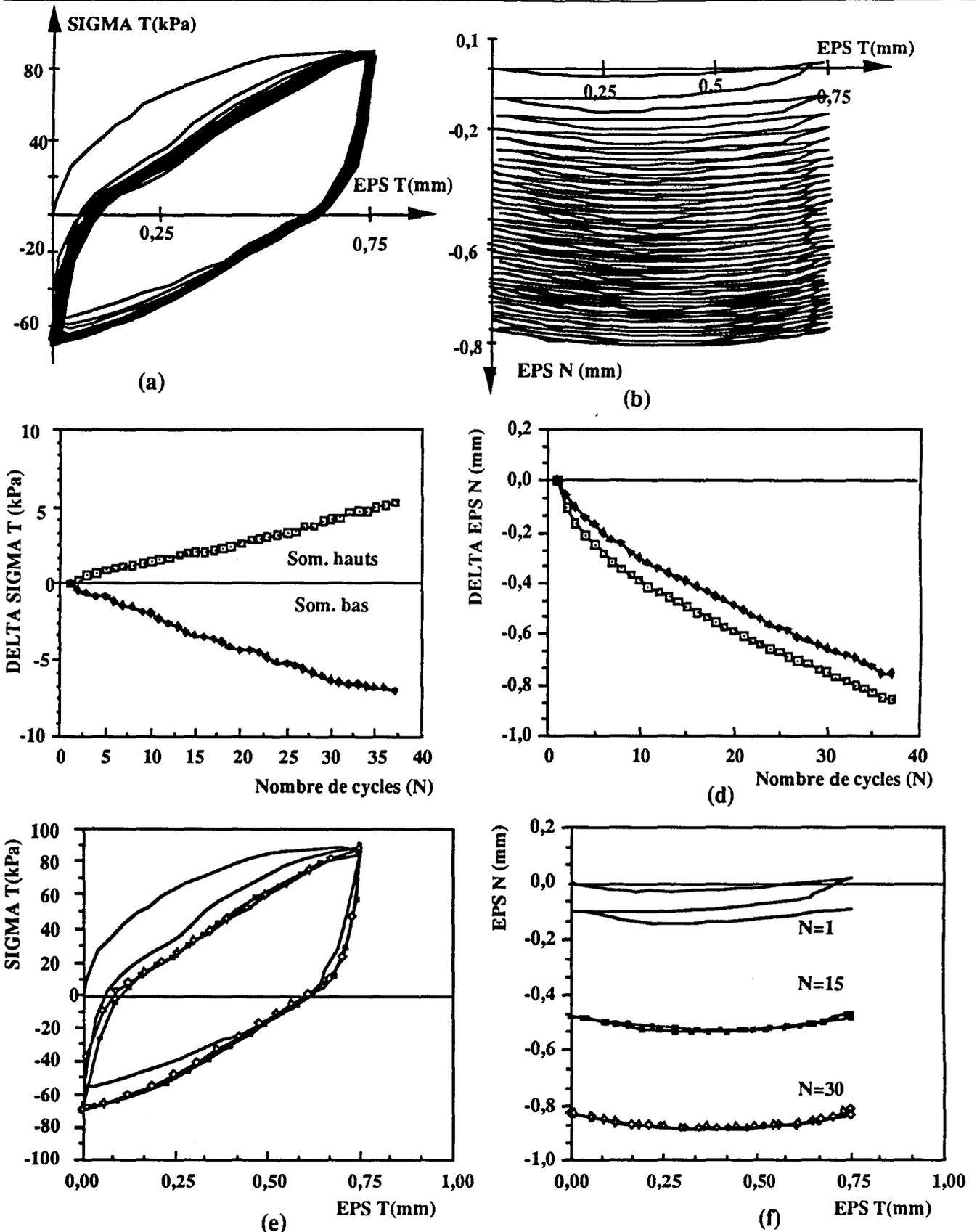


Figure : 3.7- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $0 \leq \gamma \leq +0,75 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $Dr = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 15 et 30)

Essais cycliques à contrainte de cisaillement contrôlée ($\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$)

Deux essais cycliques à contrainte de cisaillement contrôlée ont été effectués afin d'étudier l'influence du niveau de cisaillement sur le comportement cyclique. Ces essais ont été réalisés dans le domaine pré-pic. Ci-après, nous allons présenter les résultats de ces essais.

Les résultats d'un essai ondulatoire ($0 \text{ kPa} \leq \tau \leq 60 \text{ kPa}$) sont illustrés dans les figures 3.8a à 3.8f. On constate que le chargement cyclique induit un déplacement tangentiel irréversible à un taux qui décroît au cours du chargement.

On note que le déplacement normal cumulé par cycle est contractant. Après 40 cycles, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,13 mm.

Les résultats d'un deuxième essai alterné ($-65 \text{ kPa} \leq \tau \leq 65 \text{ kPa}$) sont illustrés dans les figures 3.9a à 3.9f. On constate une diminution de l'amplitude du déplacement relatif tangentiel au cours du chargement. Ceci traduit un durcissement cyclique de l'interface. Cette diminution est importante lors des premiers cycles et tend à se stabiliser à partir du 15^{ème} cycle.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note dans les premiers cycles un comportement contractant suivi d'une dilatance qui diminue au cours du chargement. Le taux de contractance est important au début du chargement et tend par la suite à se stabiliser.

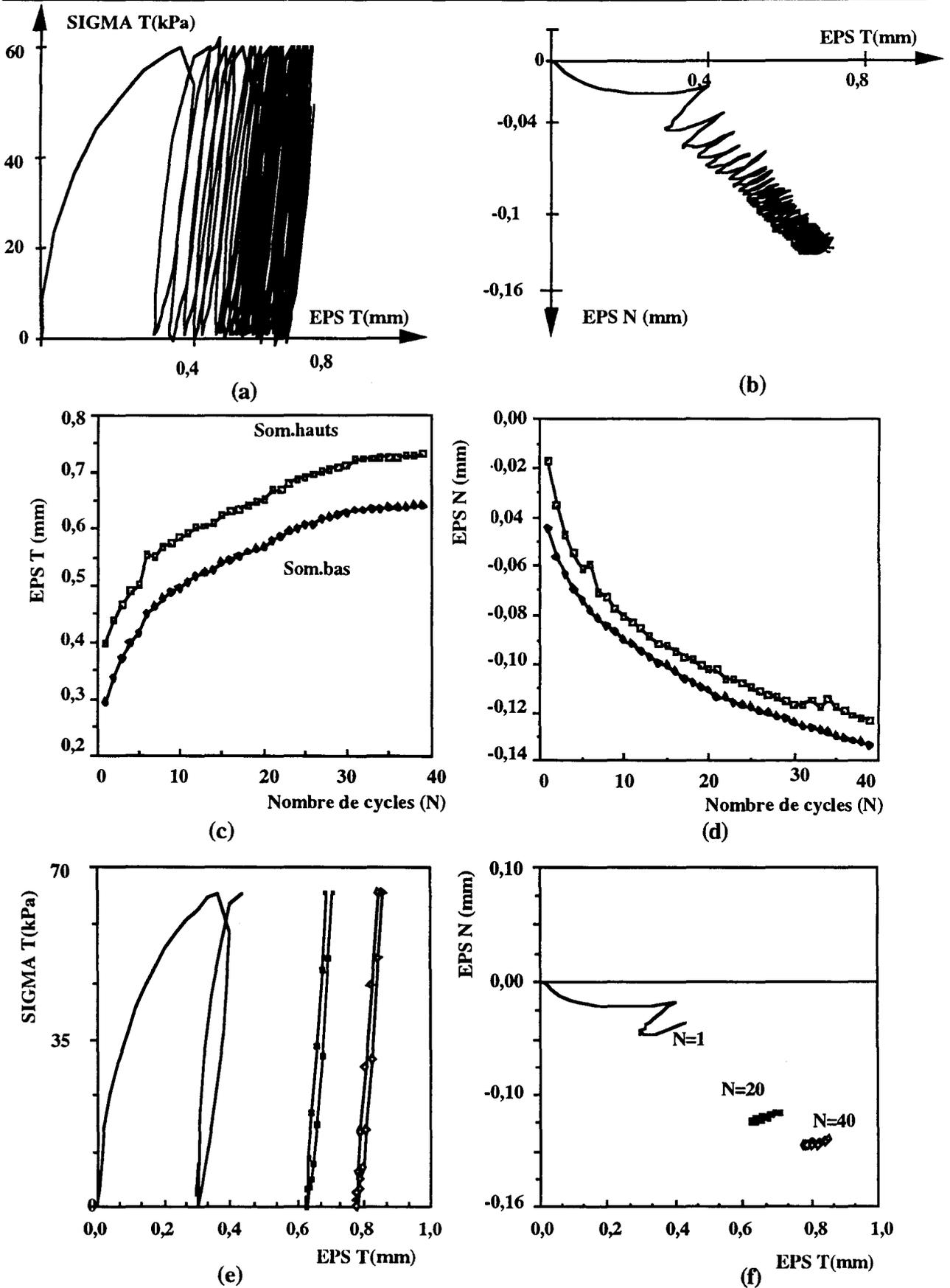


Figure : 3.8- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $0 \leq \tau \leq +60$ kPa
Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

- (a,b: Evolution de τ et ε_n aux cours des cycles)
- (c,d: Evolution de τ et ε_n aux sommets des cycles)
- (e,f: τ et ε_n aux cycles: 1, 20 et 40)

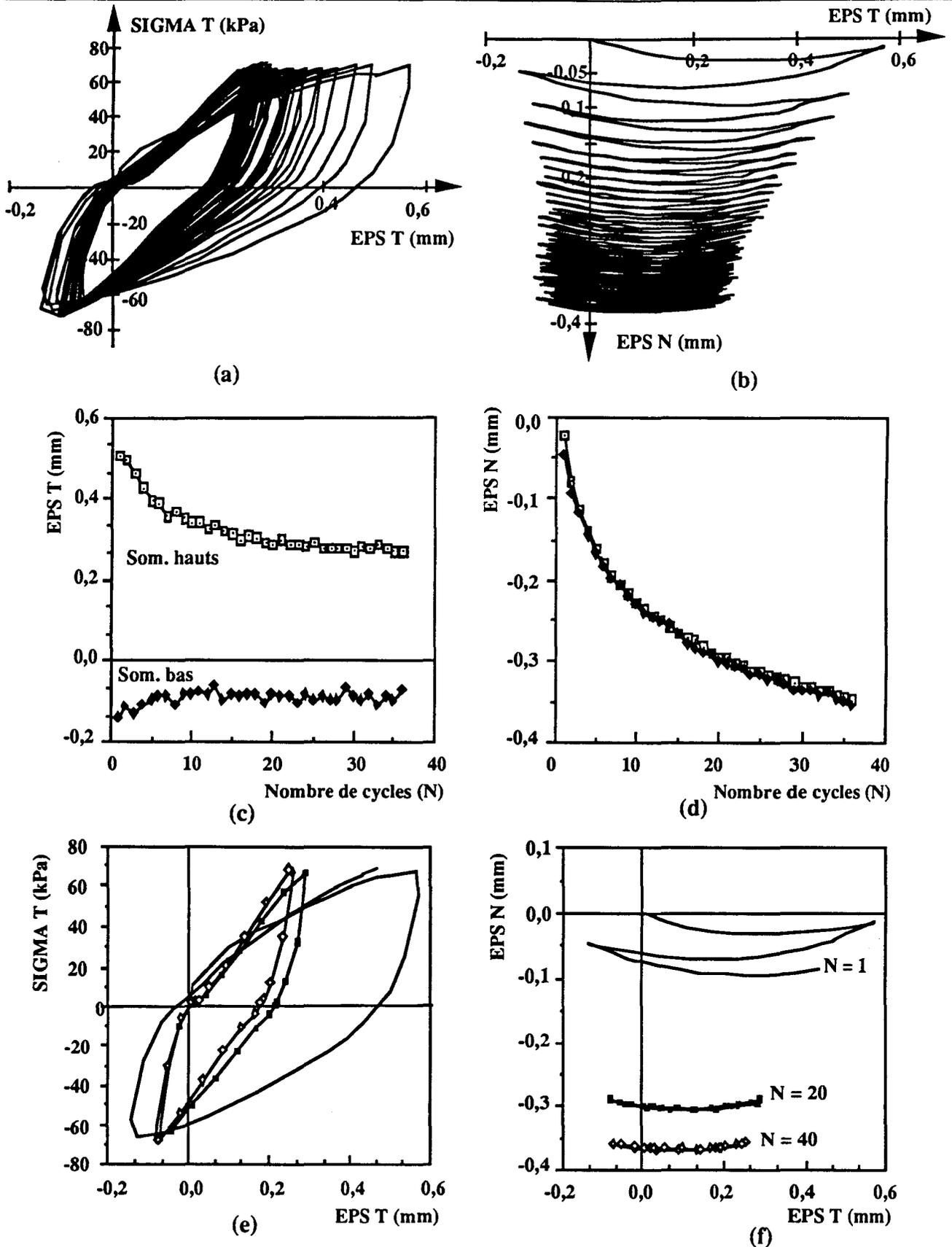


Figure : 3.9- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-65 \text{ kPa} \leq \tau \leq +65 \text{ kPa}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

Sable lâche

Essais cycliques à déplacement tangentiel contrôlé ($\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$)

Trois essais de cisaillement cyclique à contrainte normale constante ont été effectués afin d'étudier l'effet de la forme et de l'amplitude des cycles sur le comportement cyclique.

Les résultats d'un premier essai alterné ($-0,75 \text{ mm} \leq \gamma \leq +0,75 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.10a à 3.10f. On constate que la contrainte de cisaillement mobilisée augmente rapidement au cours des premiers cycles et tend à se stabiliser au cours des derniers cycles. Ceci montre que ce type de chargement induit un écrouissage cyclique qui se traduit par un durcissement de l'interface.

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que les cycles de chargement comportent une phase de contractance suivie d'une petite phase de dilatance. Le taux de contractance diminue avec le nombre de cycles. Après 20 cycles de chargement, on obtient un déplacement normal contractant de l'ordre de 0,8 mm. On note également qu'à chaque inversion, le comportement de l'interface est contractant.

Les résultats d'un essai alterné effectué avec une amplitude plus importante ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont présentés dans les figures 3.11a à 3.11f. On constate que la contrainte tangentielle mobilisée croît au cours du chargement. Ceci traduit, comme dans le cas du premier essai, un phénomène de durcissement cyclique. On note que l'écrouissage cyclique est plus marqué que celui observé lors des essais réalisés avec une amplitude plus faible.

Une comparaison des résultats des deux essais réalisés ($-0,75 \text{ mm} \leq \gamma \leq +0,75 \text{ mm}$) et ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) montre que le déplacement normal cumulé augmente avec l'amplitude du chargement. Il passe de 0,8 à 1,7 mm lorsque l'amplitude de chargement croît de 0,75 à 1 mm.

Les figures 3.12a à 3.12f présentent les résultats d'un essai ondulaire ($0 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$). On constate que le chargement cyclique induit un écrouissage cyclique positif qui se traduit par une augmentation de la contrainte de cisaillement mobilisée de l'ordre de 12 kPa au bout de 36 cycles.

En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on constate que le comportement est globalement contractant avec une diminution du déplacement normal par cycle au cours de chargement. Après 36 cycles, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,25 mm (Figures 3.12b et 3.12d).

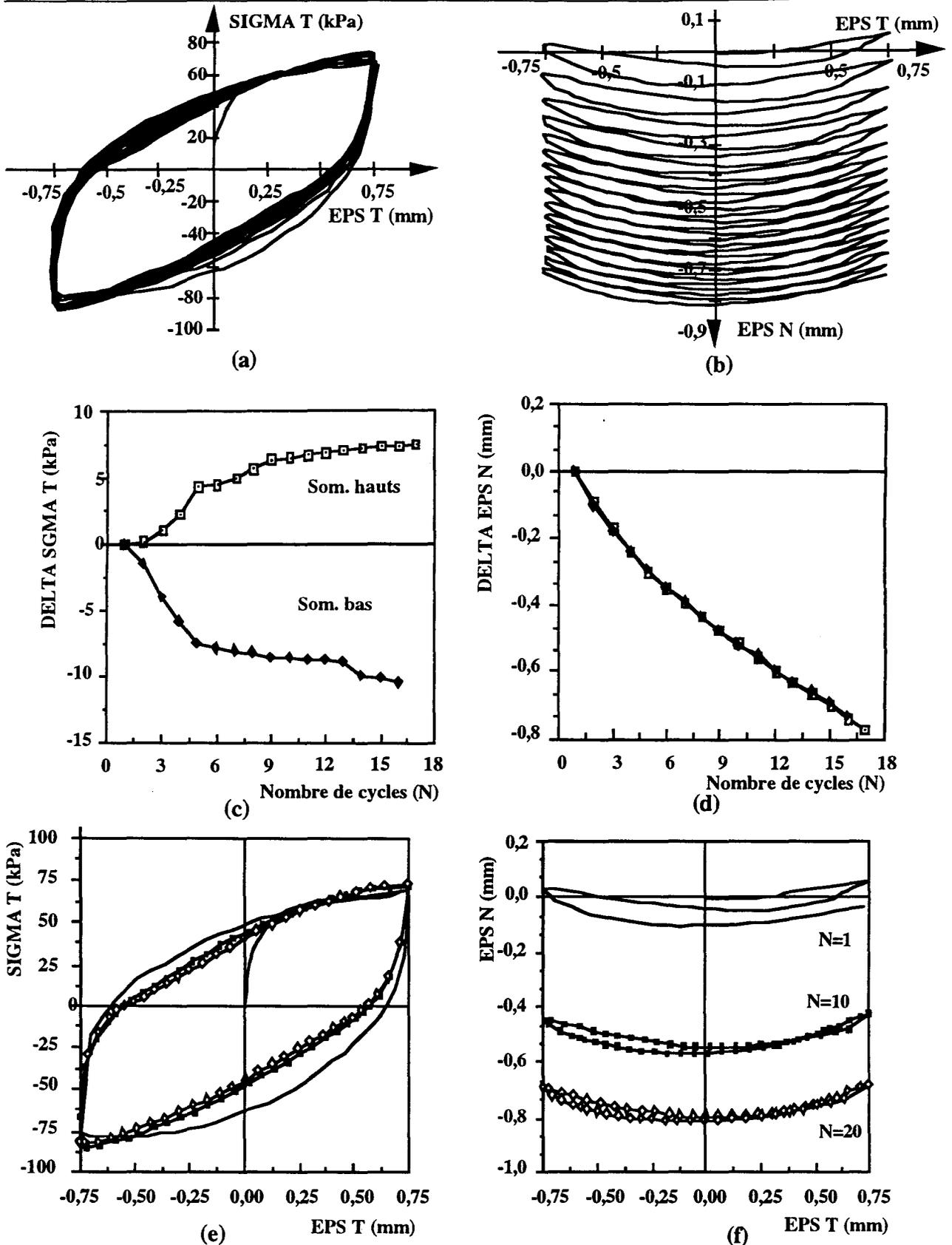


Figure : 3.10- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-0,75 \text{ mm} \leq \gamma \leq +0,75 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ε_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ε_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ε_n aux cycles: 1, 10 et 20)

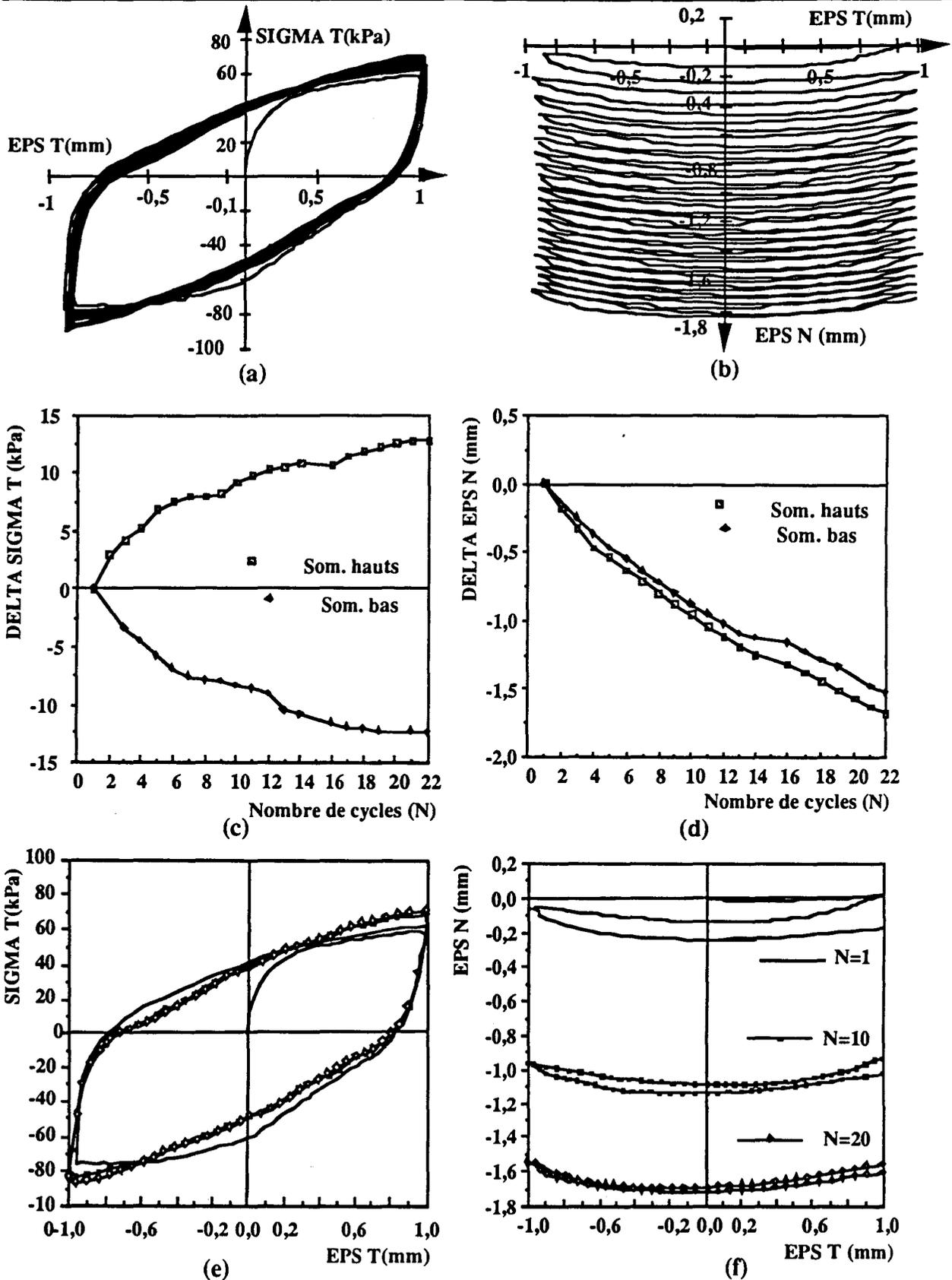


Figure : 3.11- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $Dr = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

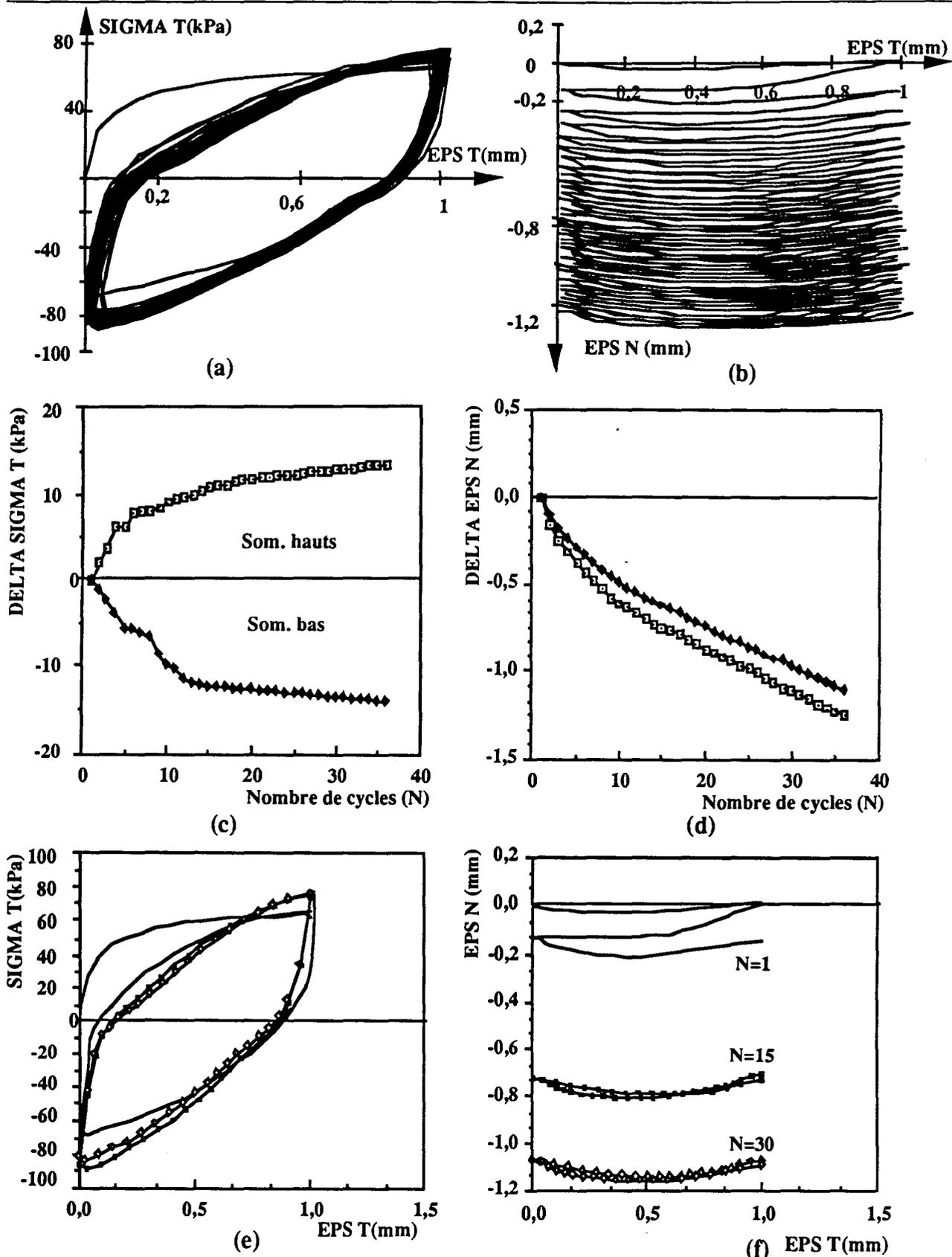


Figure : 3.12- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $0 \leq \gamma \leq +1$ mm

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

- (a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
- (c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
- (e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 15 et 30)

Essais cycliques à contrainte de cisaillement contrôlée ($\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$)

Les résultats d'un essai ondulaire ($0 \text{ kPa} \leq \tau \leq 60 \text{ kPa}$) sont illustrés dans les figures 3.13a à 3.13f. On constate que ce chargement induit une génération d'un déplacement tangentiel relatif irréversible à un taux qui décroît avec les cycles de chargement.

On note également que le comportement de l'interface est contractant et que le déplacement normal généré par cycle diminue au cours du chargement. Le déplacement normal cumulé après 70 cycles est de l'ordre de 0,22 mm.

Les figures 3.14a à 3.14f présentent les résultats d'un essai alterné ($-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq 40 \text{ kPa}$). On peut noter qu'après quelques cycles de chargement, les cycles se translatent vers la gauche, dans le plan (ϵ_t, σ_t) , tout en gardant la même forme. Ceci traduit le phénomène de mobilité cyclique.

On constate également que le déplacement normal est contractant et que le déplacement cumulé diminue avec les cycles de chargement. Le déplacement normal cumulé après 47 cycles est de l'ordre de 0,43 mm.

Les résultats d'un deuxième essai alterné ($-55 \text{ kPa} \leq \tau \leq 55 \text{ kPa}$) sont illustrés dans les figures 3.15a à 3.15f. On constate que l'amplitude du déplacement relatif tangentiel mobilisé diminue au cours du chargement. Ceci signifie que le chargement cyclique induit un durcissement de l'interface.

En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que les cycles comportent une phase de contractance importante au début de l'essai et que la contractance cumulée par cycle diminue au cours du chargement. Après 45 cycles, on obtient un déplacement normal cumulé contractant de l'ordre de 0,63 mm.

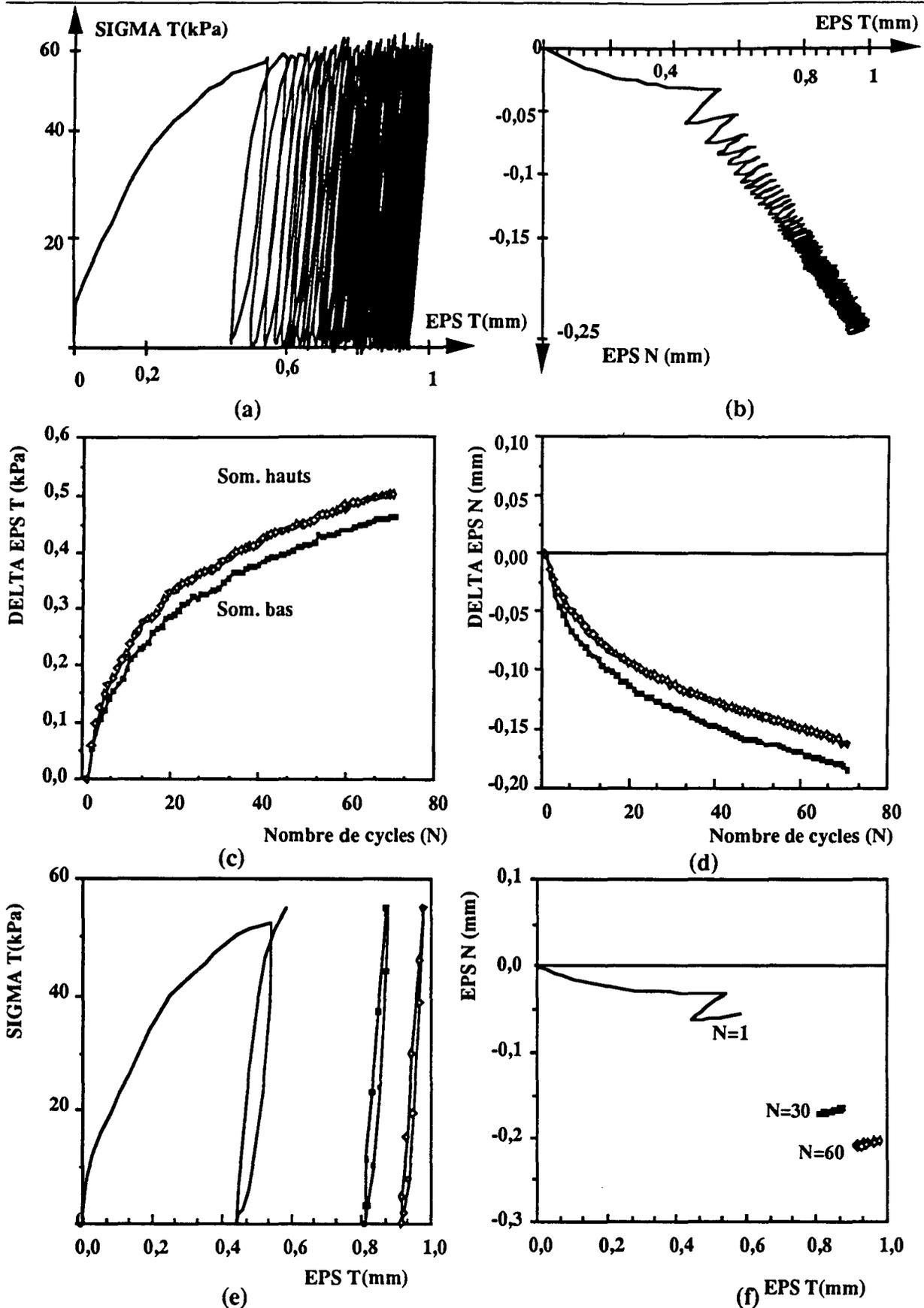


Figure : 3.13- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $0 \leq \tau \leq +60$ kPa
Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 30 et 60)

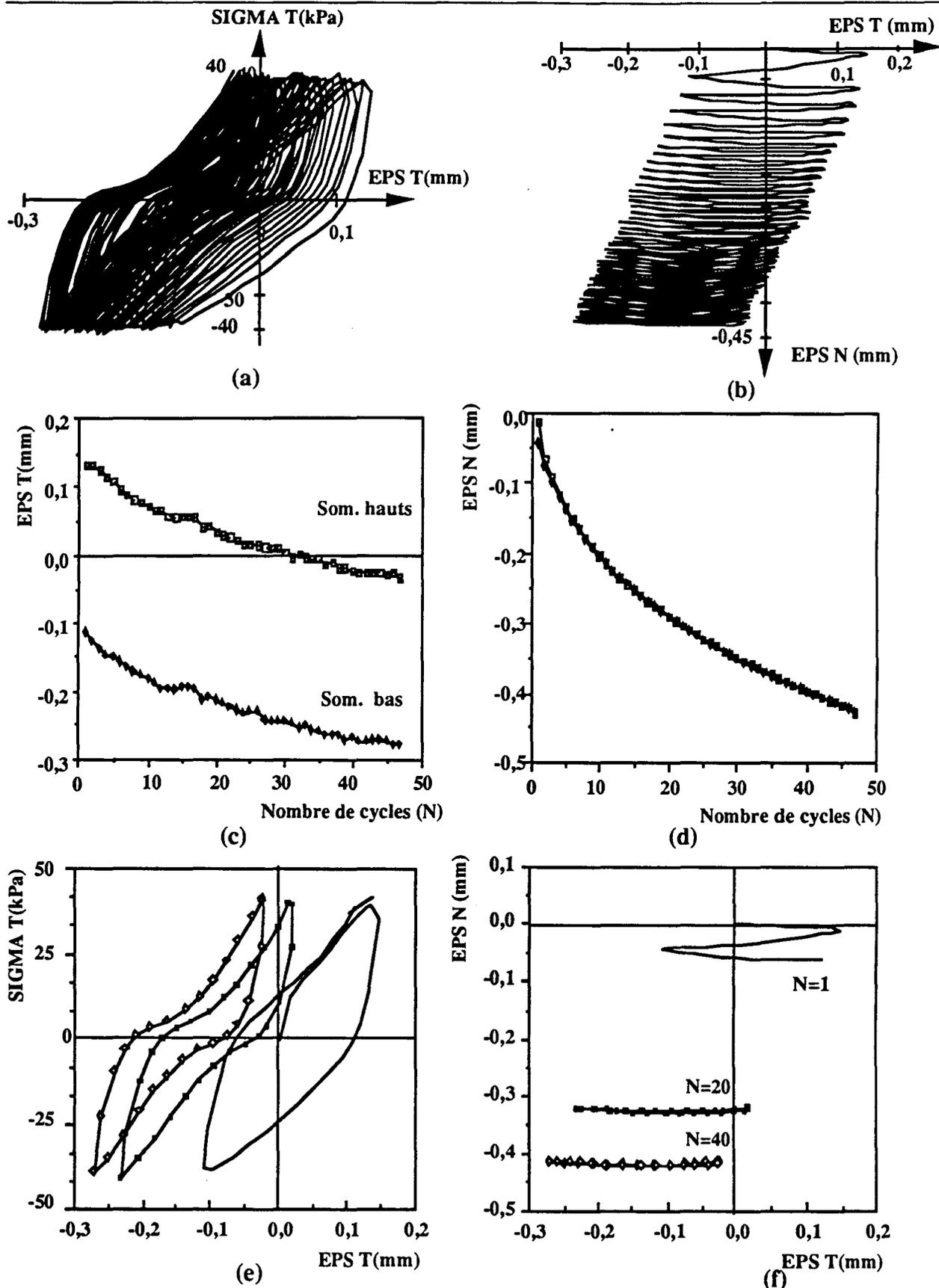


Figure : 3.14- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$
Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

- (a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
- (c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
- (e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

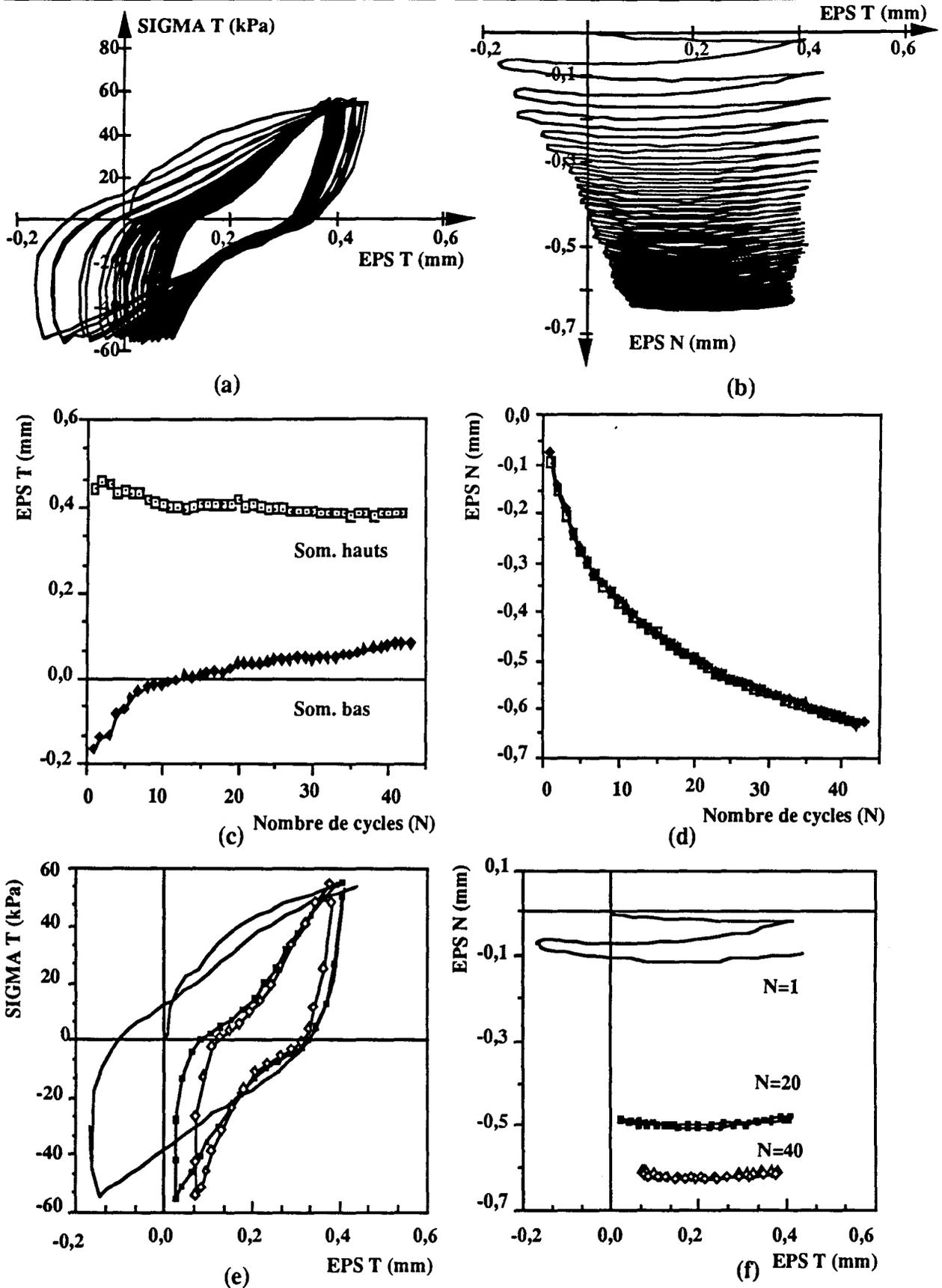


Figure : 3.15- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-55 \text{ kPa} \leq \tau \leq +55 \text{ kPa}$
Sable d'Hostun, surface rugueuse, $Dr = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

3.1.1.2. Essais à déplacement normal bloqué

Afin de disposer des essais cycliques pour la validation de modèles, nous avons réalisé une série d'essais cycliques alternés ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) à déplacement normal bloqué.

Sable dense

Les résultats d'un essai cyclique alterné ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) à déplacement normal bloqué sont donnés dans les figures 3.16a à 3.16f. On note que la contrainte normale subit une diminution suivie par une augmentation au cours des cycles. A chaque inversion du chargement, le comportement contractant de l'interface induit une diminution des contraintes normale et de cisaillement. Le comportement globalement contractant de l'interface induit une diminution de la contrainte normale au cours de chargement, en particulier lors des premiers cycles. Cette diminution induit une perte de résistance de l'interface qui tend à s'annuler en fin du chargement.

Sable lâche

Les figures 3.17a à 3.17f illustrent les résultats d'un essai cyclique alterné ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sur sable lâche. On constate que le comportement cyclique contractant de l'interface induit une diminution très importante de la contrainte normale, en particulier au cours du premier cycle. Ceci induit une réduction importante de la résistance au cisaillement de l'interface.

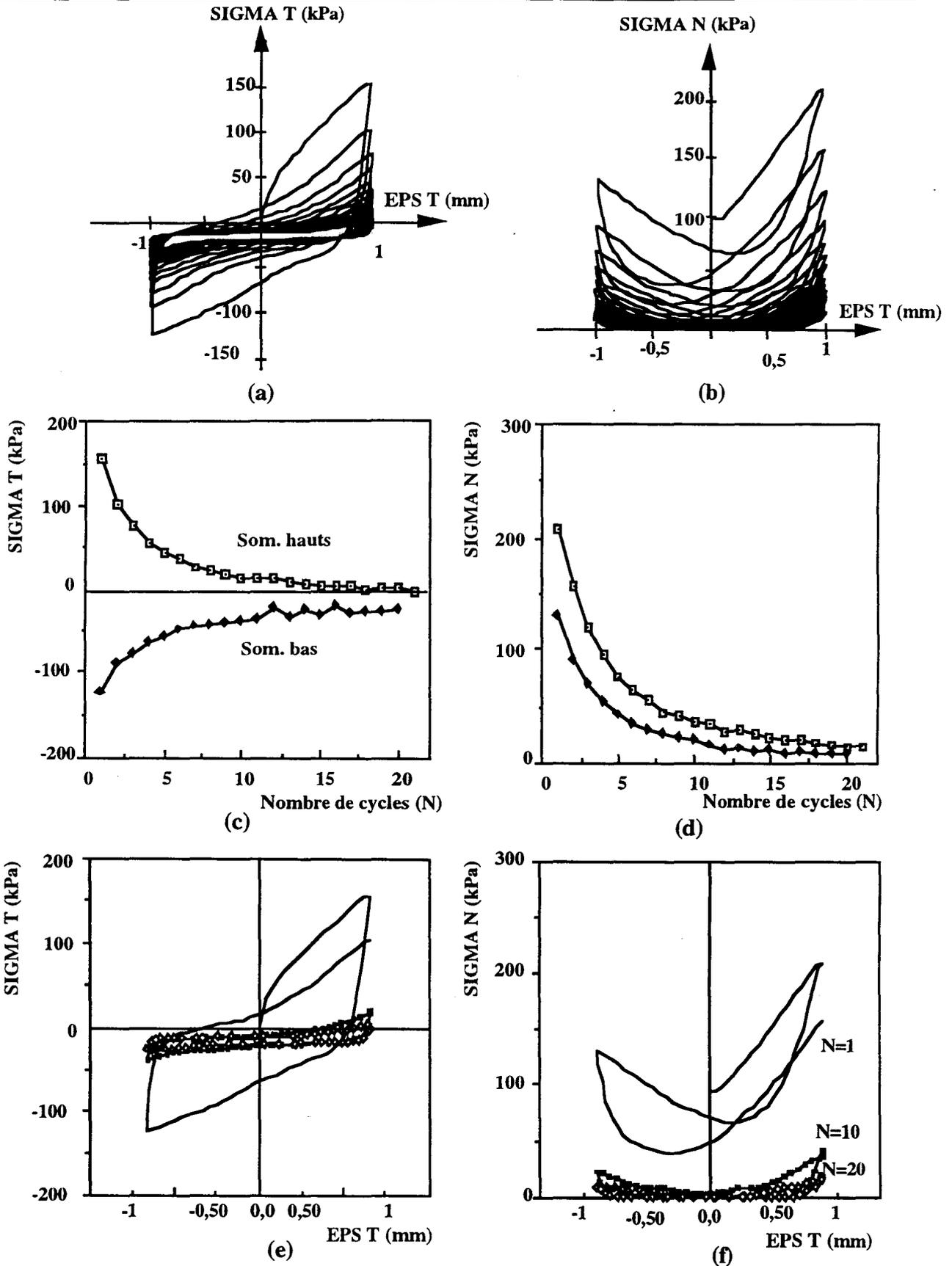


Figure : 3.16- Essai cyclique à $\epsilon_n=0$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

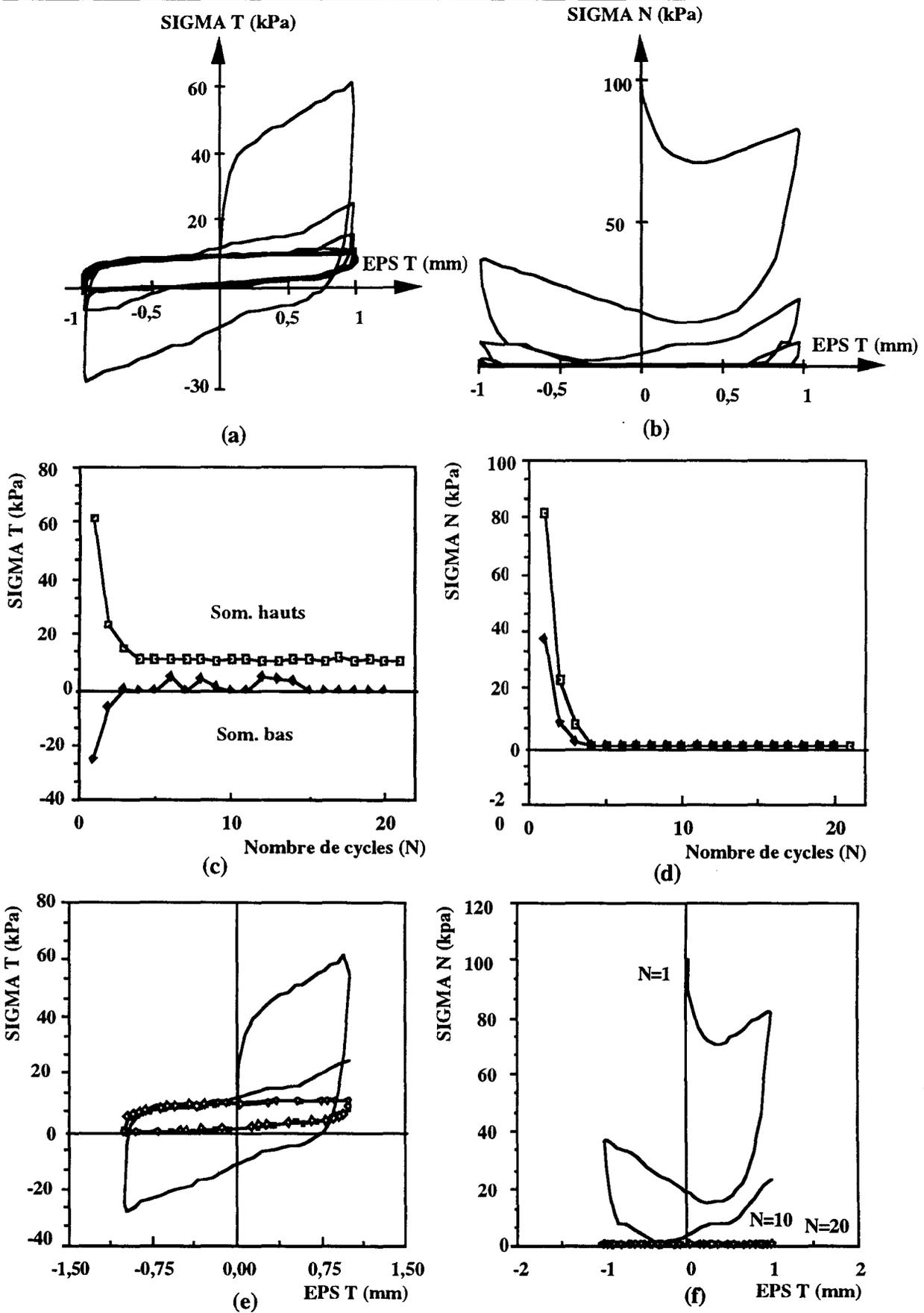


Figure : 3.17- Essai cyclique à $\varepsilon_n=0$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$
Sable d'Hostun, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

3.1.2. Surface lisse

Des essais de cisaillement cyclique ont été effectués à contrainte normale constante et à déplacement normal bloqué et ceci pour deux densités (sables dense et lâche). Afin d'illustrer les niveaux de chargement cyclique retenus, nous donnons dans la figure 3.18a à 3.18d, les résultats des essais monotones réalisés avec cette interface.

3.1.2.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

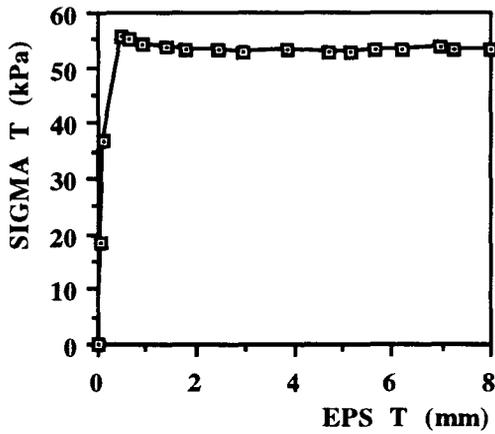
Les résultats d'un essai cyclique alterné à déplacement tangentiel ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.19a à 3.19f. On remarque que le chargement cyclique induit une diminution de la contrainte de cisaillement mobilisée, en particulier au cours des premiers cycles.

En ce qui concerne le déplacement normal, on observe, à chaque inversion, une petite phase de contractance suivie d'une stabilisation du déplacement normal. Le comportement est globalement contractant. Après 20 cycles de chargement, le déplacement normal cumulé atteint 0,36 mm. L'amplitude de la contractance cumulée par cycle diminue au cours du chargement.

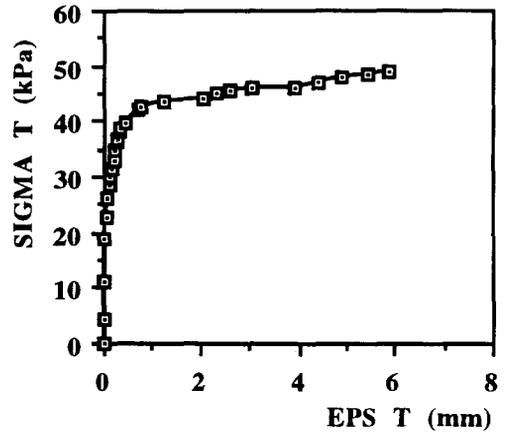
Les figures 3.20a à 3.20f illustrent les résultats d'un essai cyclique alterné en contrainte de cisaillement ($-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq 40 \text{ kPa}$). On constate que les cycles se resserrent légèrement et se translatent vers la gauche au cours du chargement. En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que les premiers cycles comportent une phase de contractance importante. Après 40 cycles, on obtient un déplacement normal cumulé de l'ordre de 0,23 mm.

Sable lâche

Les résultats d'un essai cyclique alterné à déplacement tangentiel ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.21a à 3.21f. On constate un léger écrouissage lors des premiers cycles. En ce qui concerne le déplacement normal, on note une phase de contractance suivie d'une stabilisation. Après 20 cycles de chargement, on obtient un déplacement normal contractant de l'ordre de 1 mm.

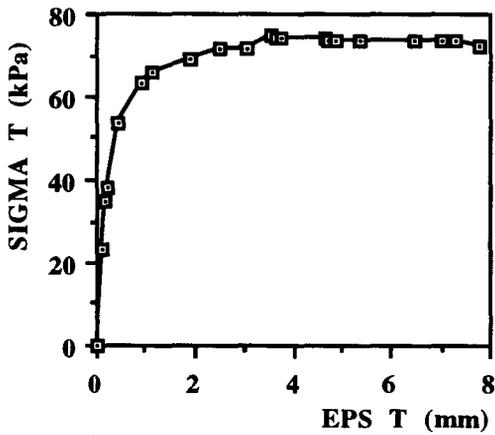


Sable dense

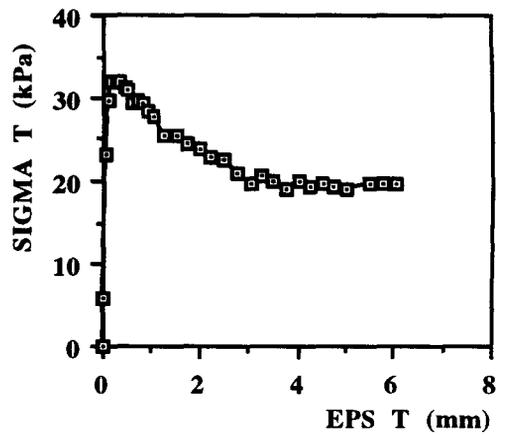


Sable lâche

Essais à contrainte normale constante



Sable dense



Sable lâche

Essais à déplacement normal bloqué

Figure : 3.18 - Résultats des essais monotones d'interface. (Surface lisse, sable d'Hostun)

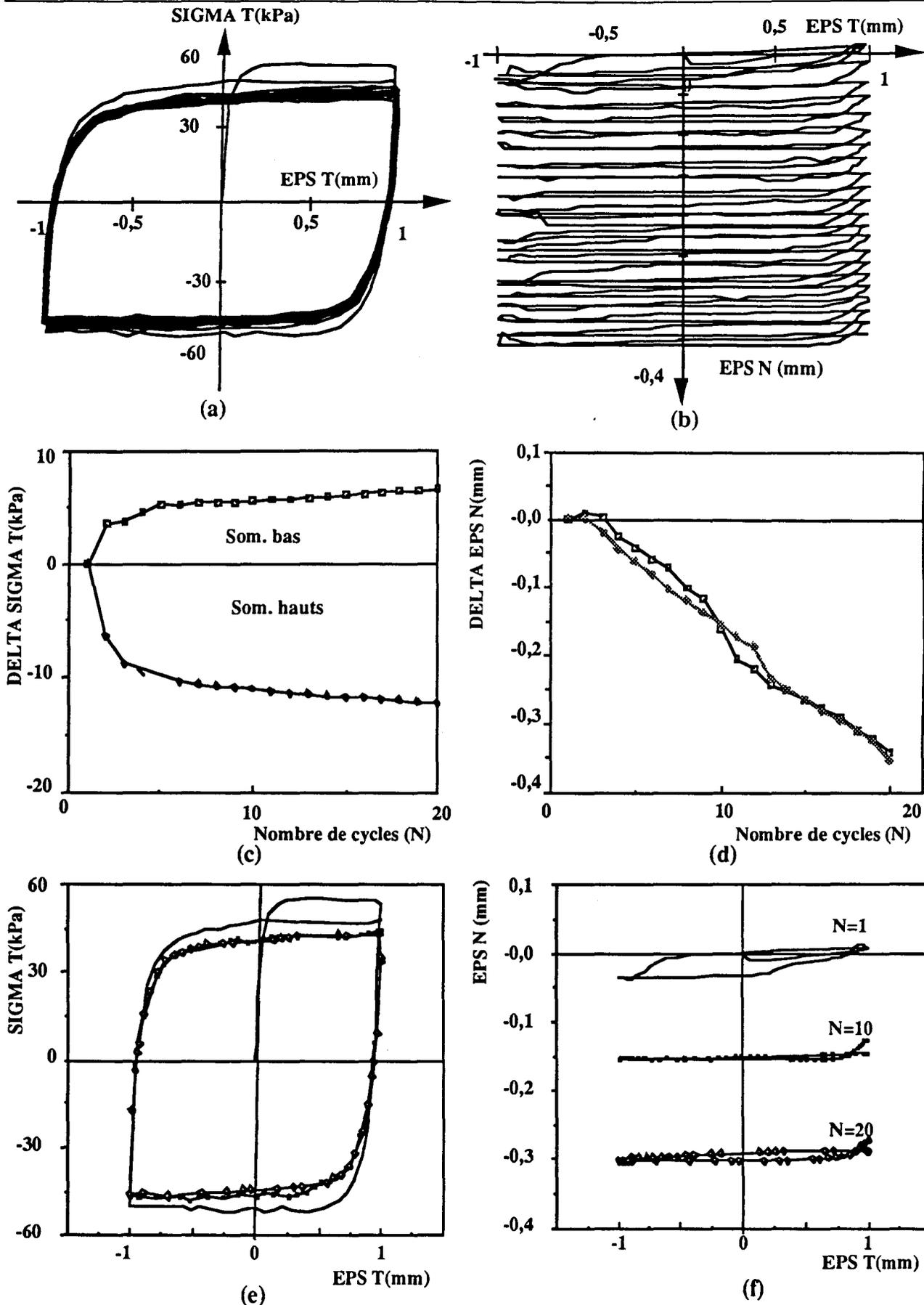


Figure : 3.19- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$
 Sable d'Hostun, surface lisse, $Dr = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles) et (e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

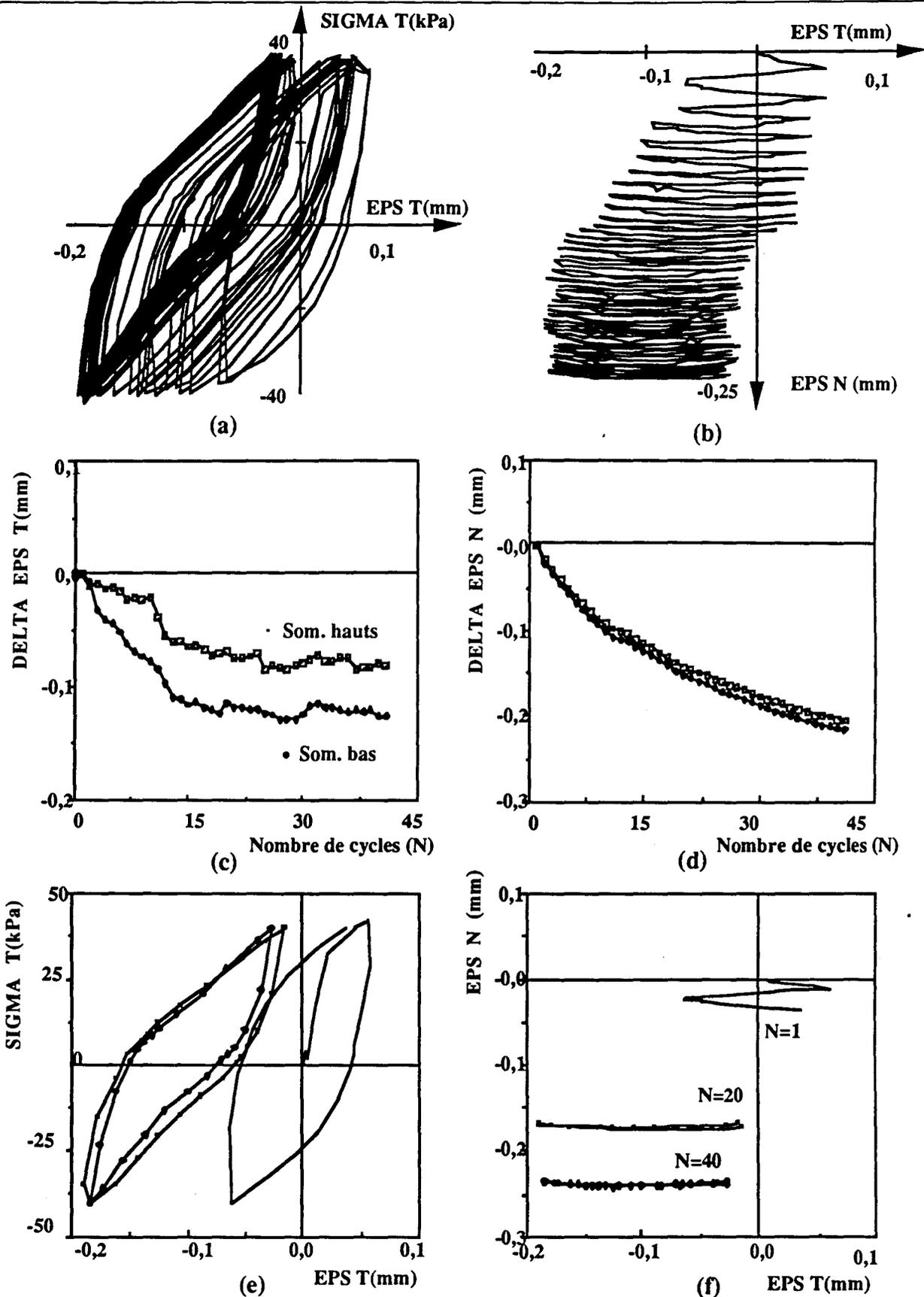


Figure : 3.20- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$

Sable d'Hostun, surface lisse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

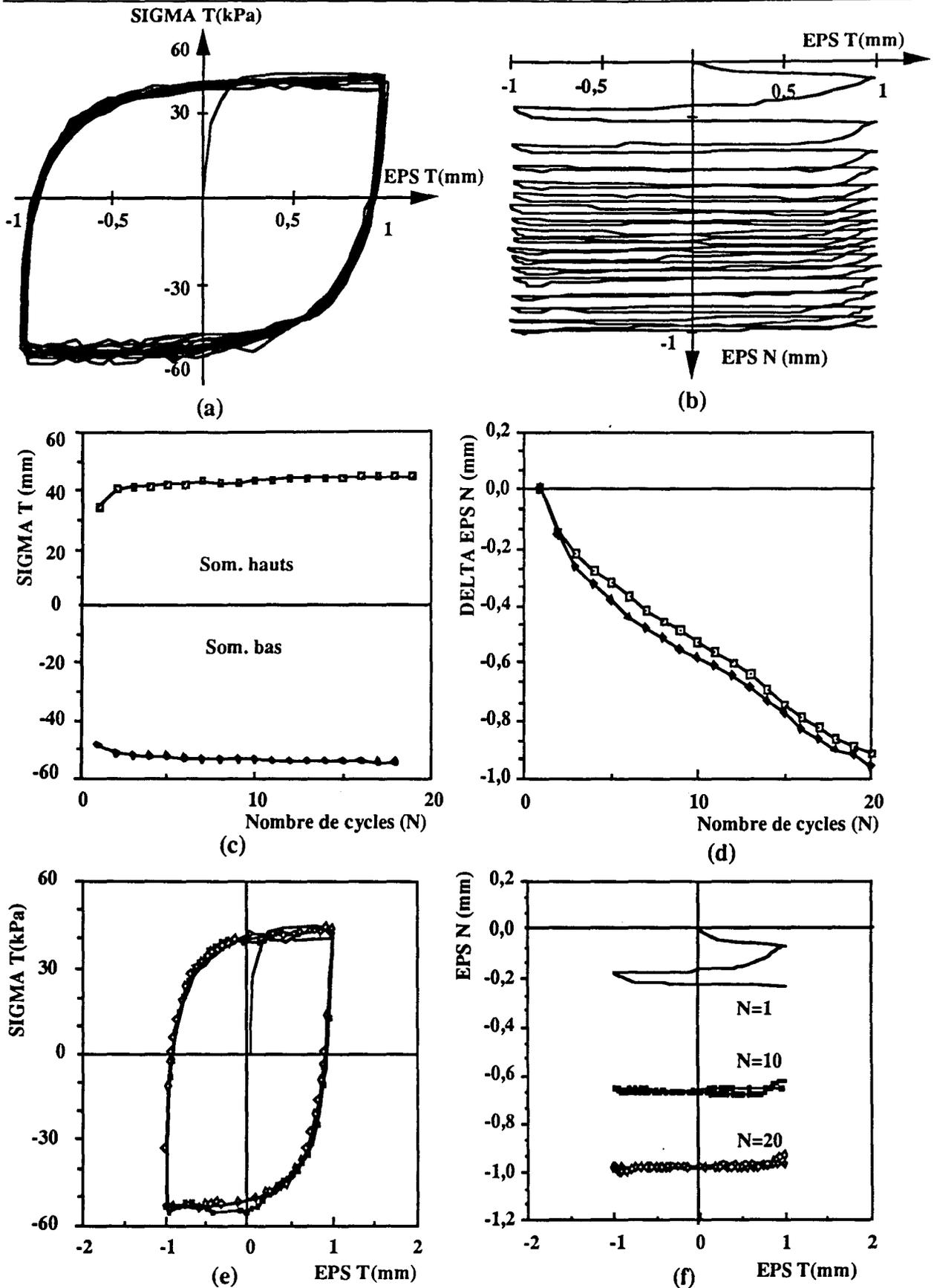


Figure : 3.21- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable d'Hostun, surface lisse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

Les résultats d'un essai cyclique alterné en contrainte de cisaillement ($-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq 40 \text{ kPa}$) sont illustrés dans les figures 3.22a à 3.22f. On constate qu'au cours de ce chargement les cycles se referment traduisant un durcissement de l'interface.

En ce qui concerne le déplacement normal, on note un comportement contractant au cours des cycles avec une diminution du déplacement normal cumulé au cours du chargement.

3.1.2.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Les résultats d'essai cyclique alterné ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) à déplacement normal bloqué sont illustrés dans les figures 3.23a à 3.23f. On note qu'à chaque inversion, la contrainte normale subit une diminution importante suivie par une légère augmentation. Le comportement globalement contractant de l'interface induit une diminution de la contrainte normale au cours du chargement, en particulier lors des premiers cycles. Cette diminution induit une perte de résistance de l'interface qui tend à s'annuler en fin du chargement.

Sable lâche

Les résultats d'un essai cyclique alterné à déplacement normal bloqué ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.24a à 3.24f. Une analyse de ces résultats montre que le comportement de l'interface est qualitativement identique à celui observé avec le sable dense, mais avec une réduction plus rapide des contraintes normale et du cisaillement.

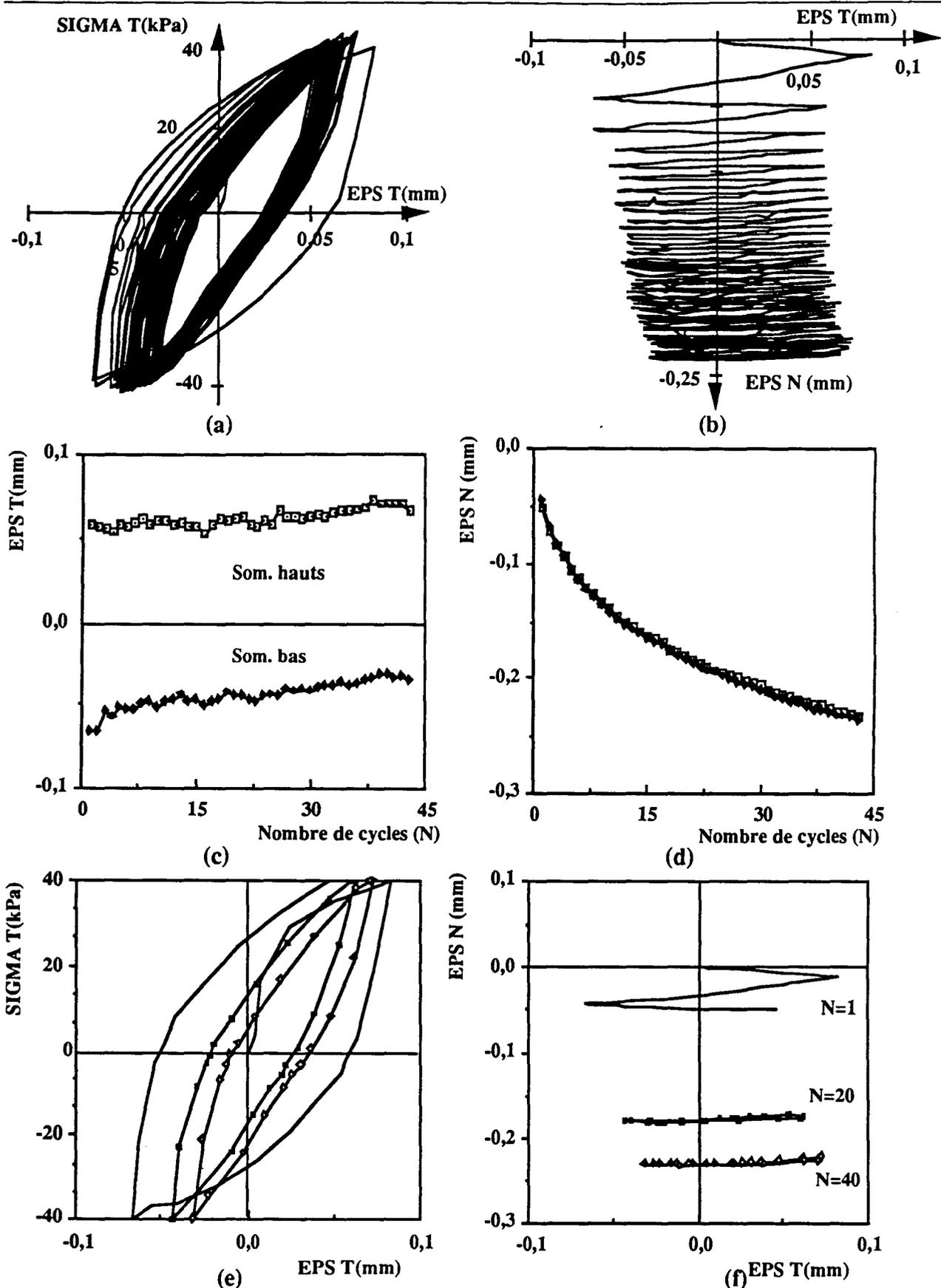


Figure : 3.22- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$

Sable d'Hostun, surface lisse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

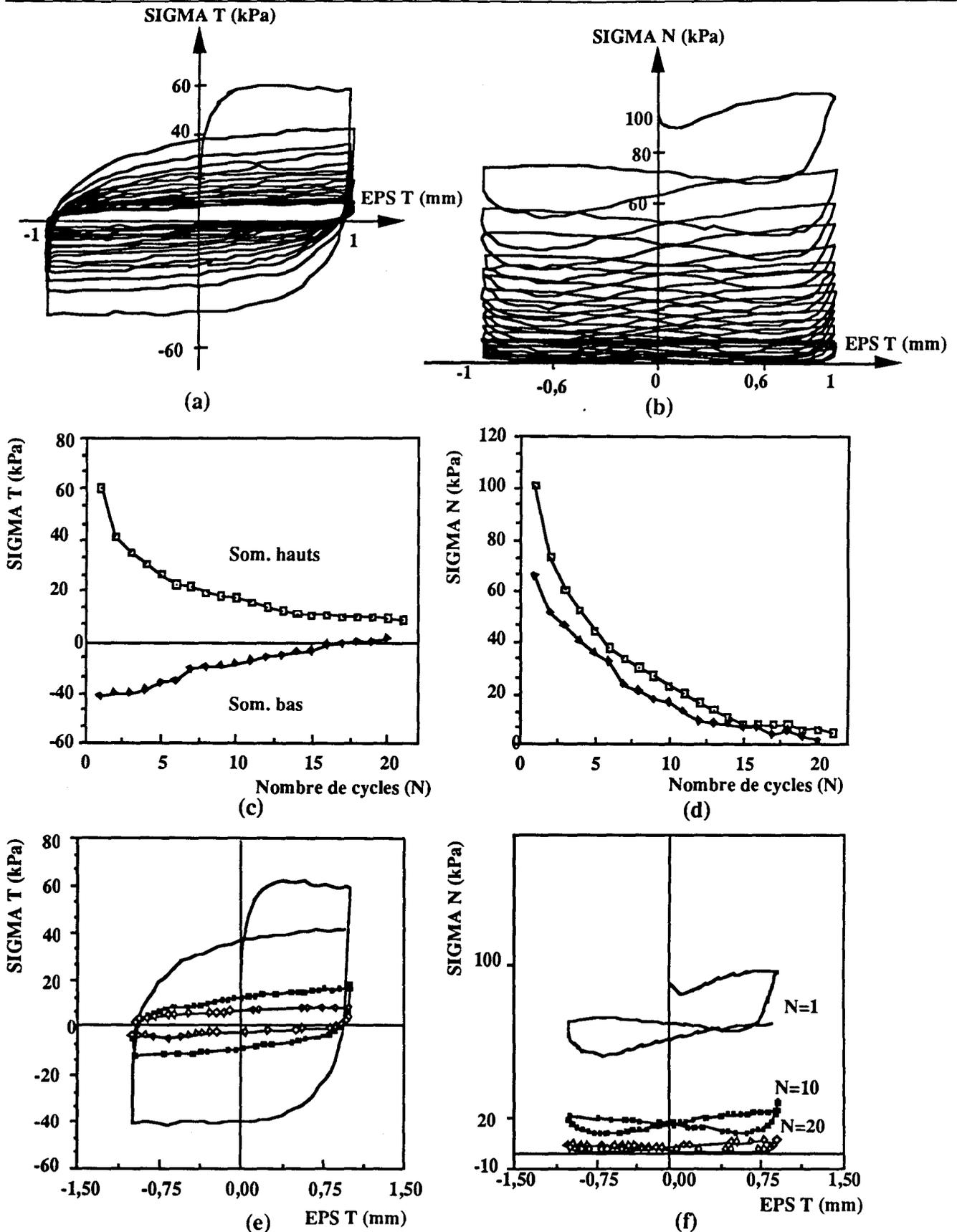


Figure : 3.23- Essai cyclique à $\epsilon_n=0$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

Sable d'Hostun, surface lisse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

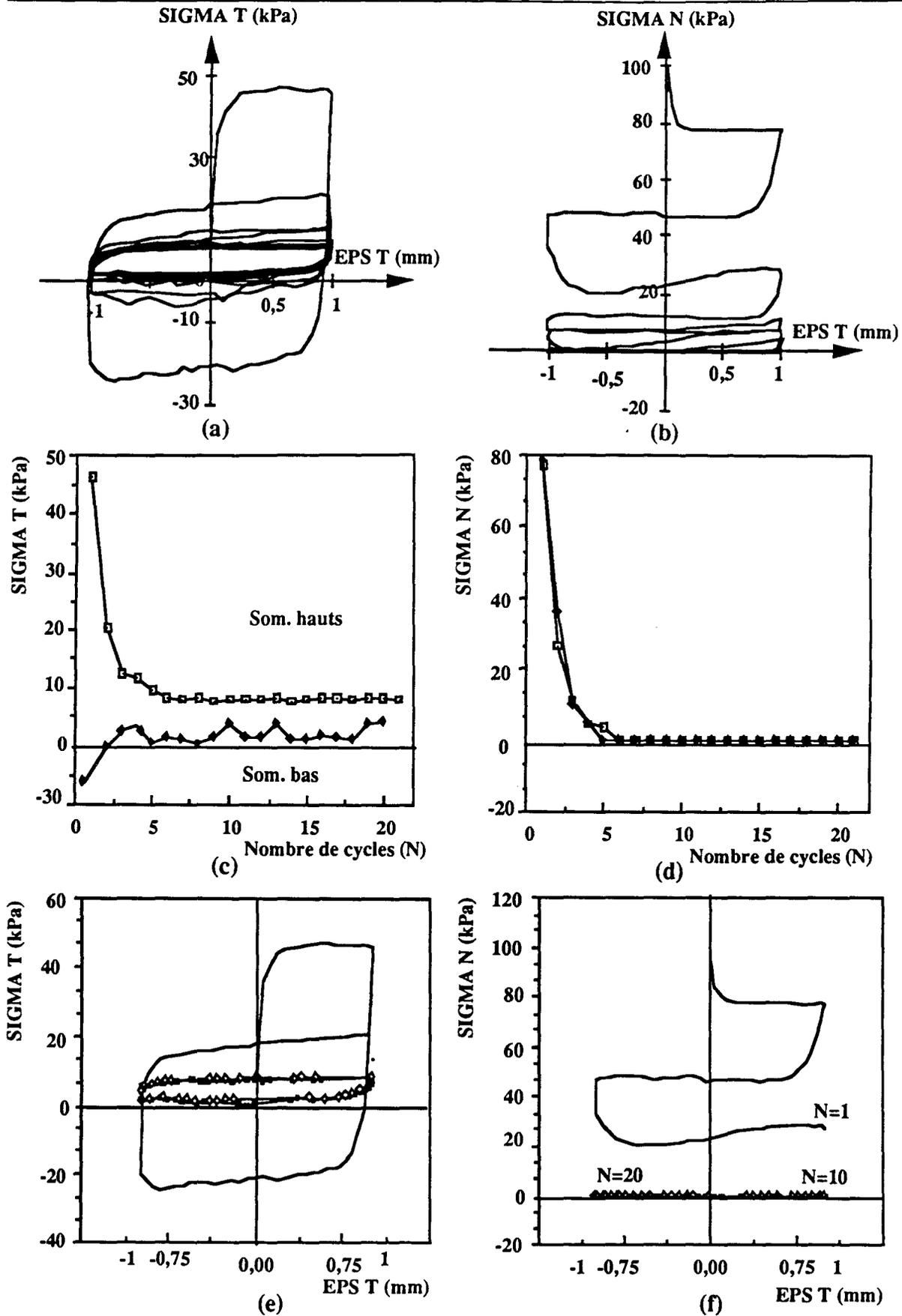


Figure : 3.24- Essai cyclique à $\epsilon_n=0$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq 1 \text{ mm}$
 Sable d'Hostun, surface lisse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

3.1.3. 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 3.25 à 3.28 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 3.27 et 3.28).

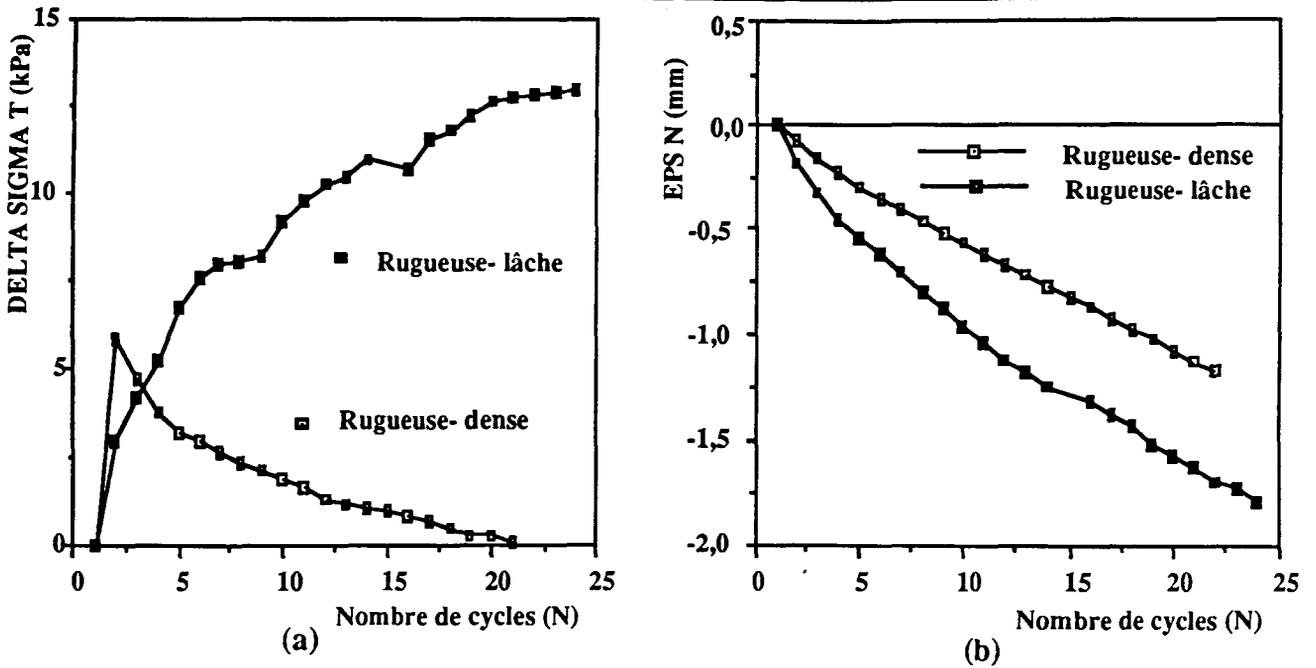


Figure : 3.25- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, surface rugueuse, sable d'HOSTUN, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

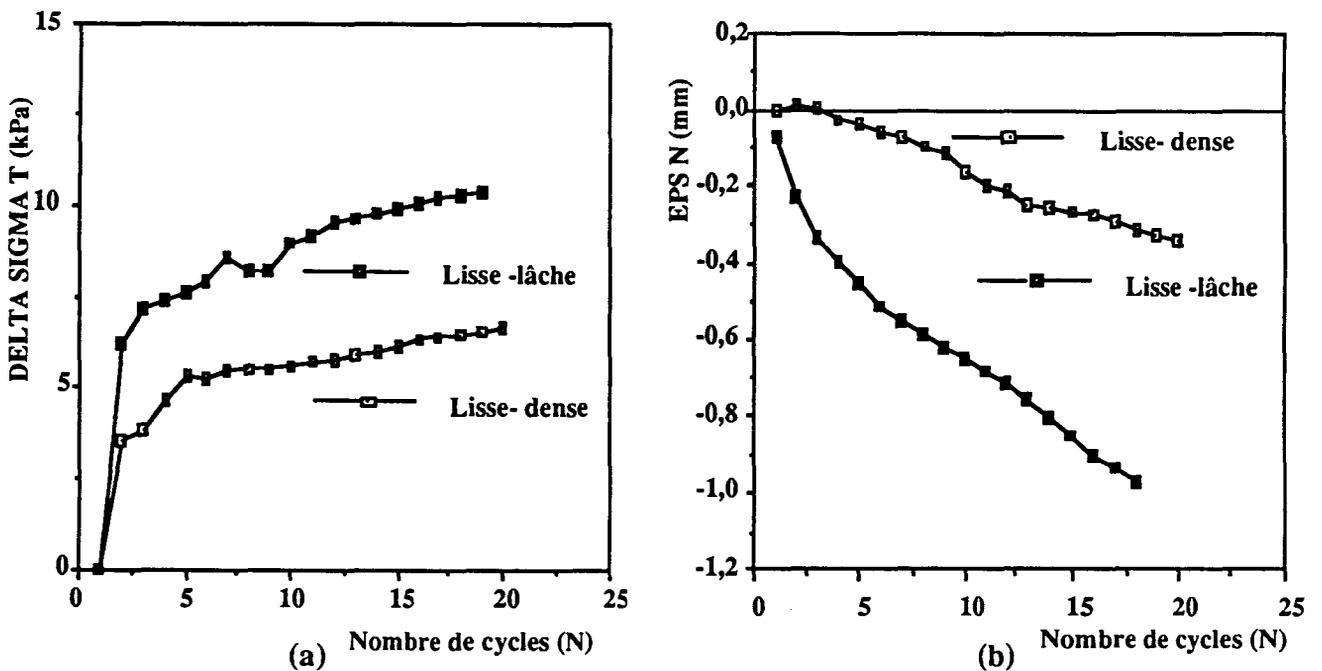


Figure : 3.26- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, surface lisse, sable d'HOSTUN, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

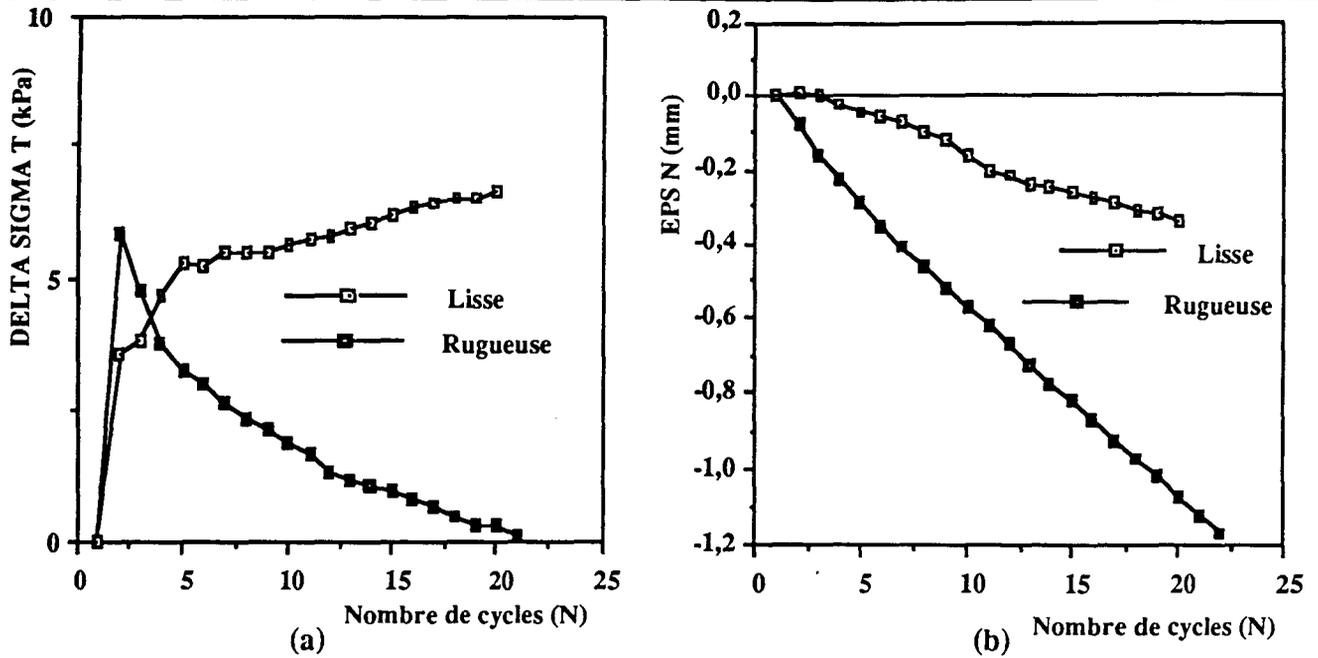


Figure : 3.27- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable d'HOSTUN dense ($D_r = 90\%$), $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

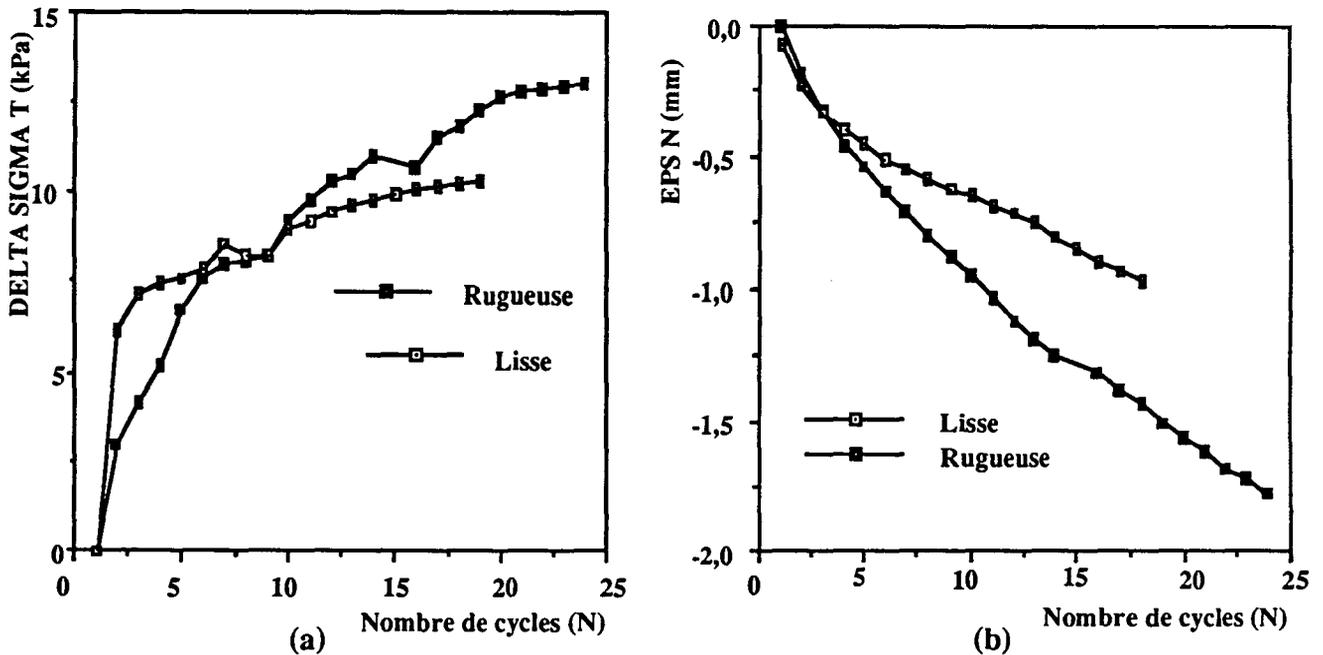


Figure : 3.28- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable d'HOSTUN lâche ($D_r = 15\%$), $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

3.2. ESSAIS CYCLIQUES SUR LE SABLE QUIOU

Les figures 3.29a à 3.29d, montre les résultats des essais monotones avec ce sable qui permet de positionner le niveau de chargement retenu lors des essais cycliques.

3.2.1. Surface rugueuse

3.2.1.1. Essais à contrainte normale constante

Sable dense

Les résultats d'un essai cyclique réalisé à déplacement tangentiel contrôlé dans le domaine pré-pic ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.30a à 3.30f. On constate que la forme du cycle change avec le chargement : on observe un aplatissement du cycle pour les faibles niveaux du déplacement tangentiel ($|\varepsilon_t| \leq +0,5 \text{ mm}$), mais une dilatation pour les forts niveaux de déplacement tangentiel relatif.

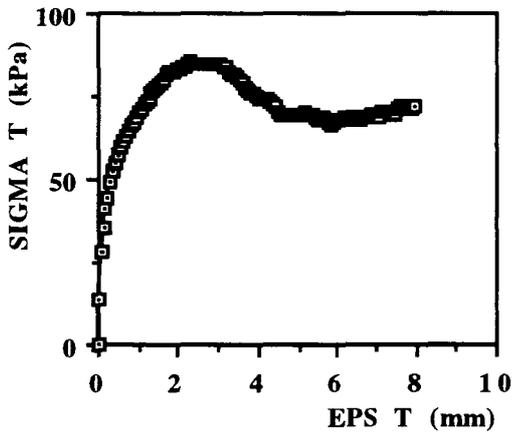
En ce qui concerne le déplacement normal, les cycles de chargement comportent une phase de contractance suivie d'une petite phase de dilatance. On note que l'amplitude de la contractance cumulée par cycle diminue avec le nombre de cycles. Après 20 cycles de chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 1,8 mm.

Un essai alterné à contrainte de cisaillement contrôlée ($-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$) a été également effectué. Les résultats de cet essai sont illustrés dans les figures 3.31a à 3.31f. Cet essai confirme les résultats obtenus lors de l'essai précédent : Le chargement cyclique induit une diminution de la rigidité pour les faibles niveaux du déplacement tangentiel, mais une augmentation de celle-ci pour les hauts niveaux de ce déplacement.

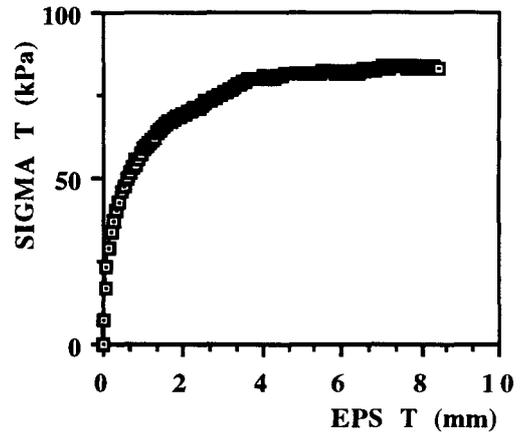
En ce qui concerne le déplacement normal, on constate que le comportement est globalement contractant. Le déplacement normal cumulé par cycle diminue avec le nombre de cycles. Après 35 cycles, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 0,41 mm.

Sable lâche

Un essai cyclique alterné en déplacement tangentiel a été effectué ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$). Les figures 3.32a à 3.32f illustrent les résultats de cet essai. On constate, comme pour le sable dense, que le chargement induit une augmentation de la rigidité au niveau des sommets, mais une diminution de celle-ci aux faibles niveaux du déplacement tangentiel.

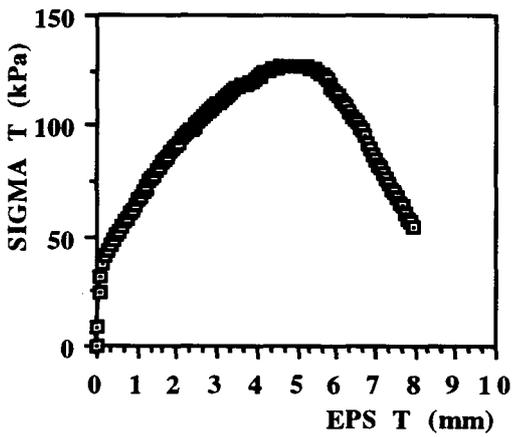


Sable dense

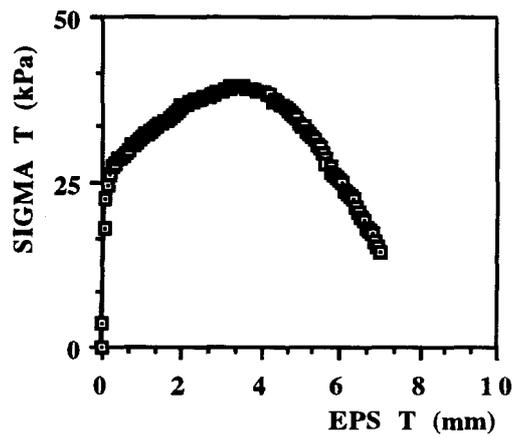


Sable lâche

Essais à contrainte normale constante



Sable dense



Sable lâche

Essais à déplacement normal bloqué

Figure : 3.29 - Résultats des essais monotones d'interface.
(Surface rugueuse, sable Carbonaté)

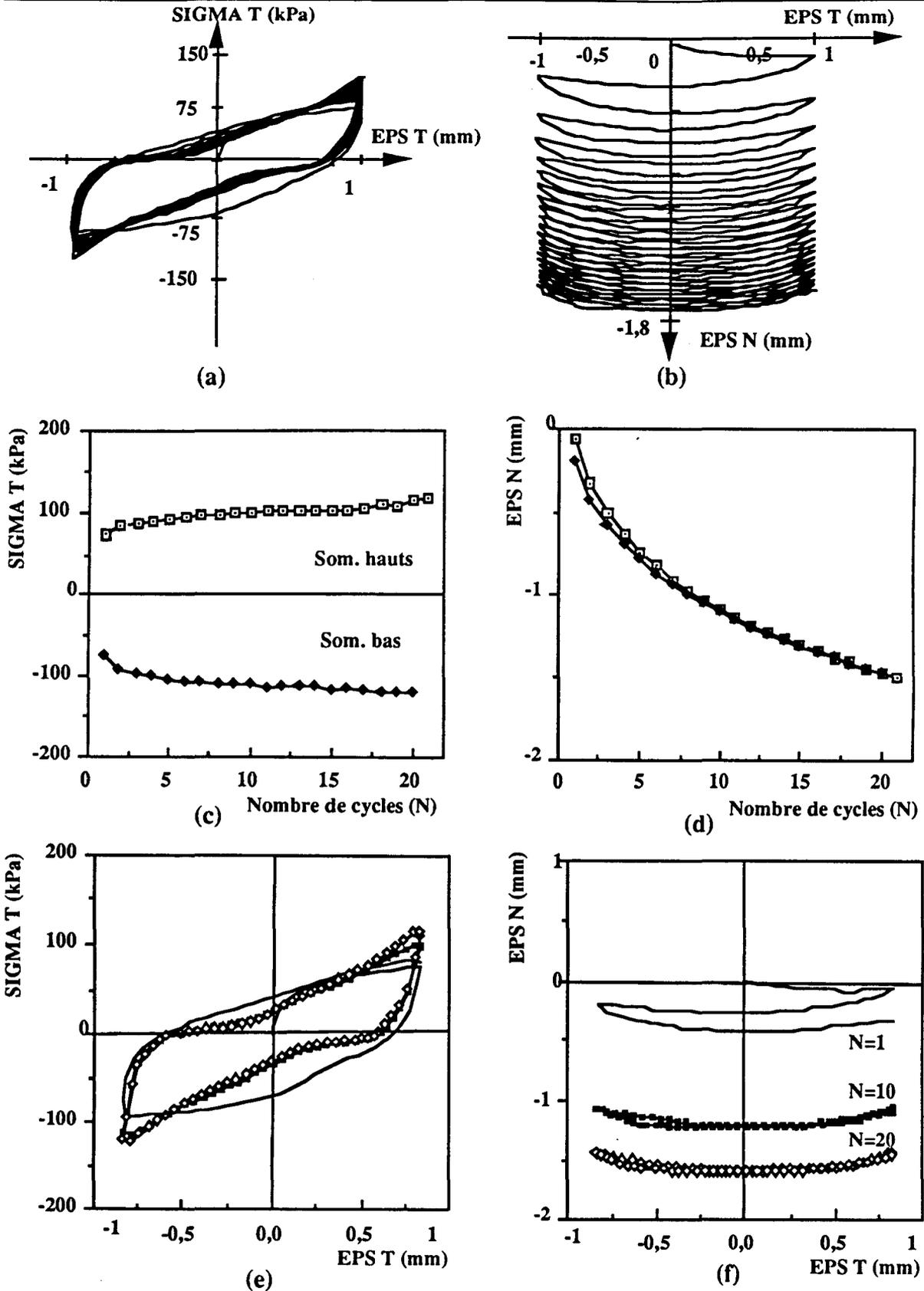


Figure : 3.30- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r \approx 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

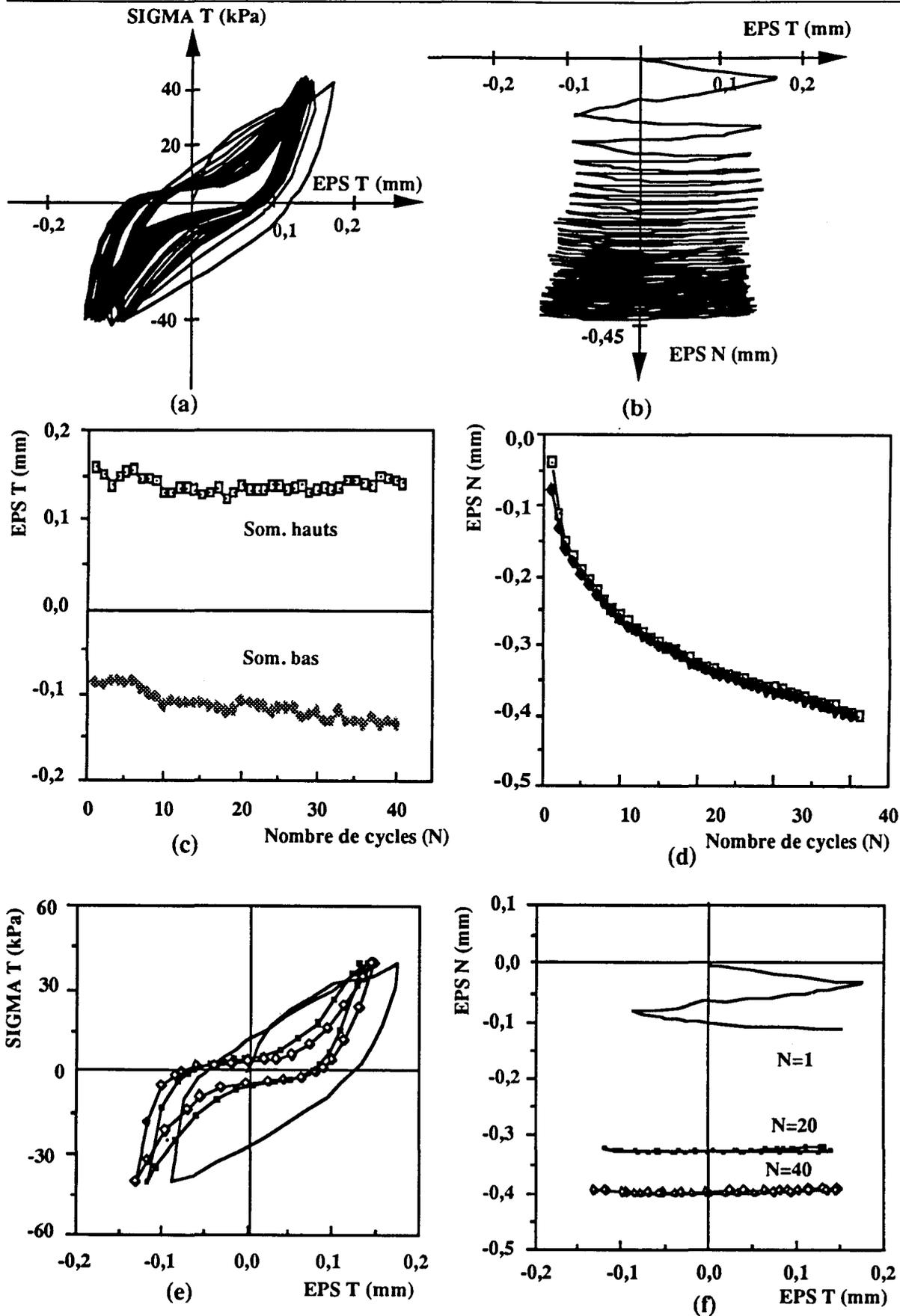


Figure : 3.31- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$
 Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r = 90\%$
 (a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
 (c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
 (e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

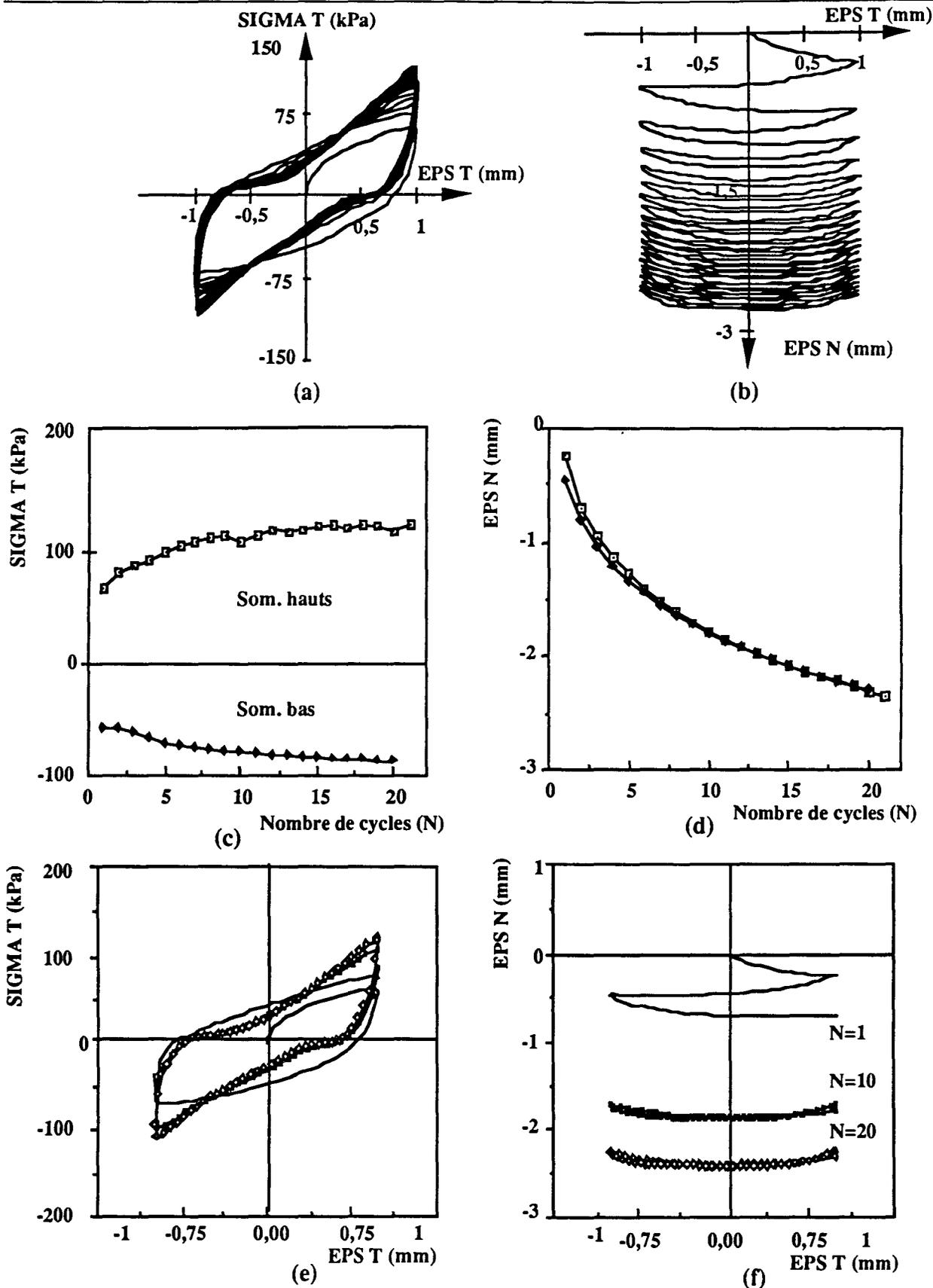


Figure : 3.32- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

- (a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)
- (c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)
- (e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

La figure 3.32b présente l'évolution du déplacement normal. On note que les cycles comportent une phase de contractance importante. Après 20 cycles de chargement, le déplacement normal cumulé est de l'ordre de 2,7 mm.

Les figures 3.33a à 3.33f illustrent les résultats d'un essai cyclique alterné à contrainte de cisaillement ($-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$). On constate que ce chargement induit une augmentation de la rigidité au cours des premiers cycles (diminution de l'amplitude du déplacement relatif tangentiel). Par la suite, on observe une stabilisation des cycles dans le plan (ϵ_t, σ_t).

3.2.1.2. Essais à déplacement normal bloqué

Sable dense

Les résultats d'un essai alterné ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sur le sable dense sont illustrés dans les figures 3.34a à 3.34f. On constate que l'inversion du sens de chargement induit une diminution sensible de la contrainte normale. Ceci est bien corrélé avec le comportement contractant du sable à l'inversion du sens de chargement. Cette diminution induit une réduction de la contrainte de cisaillement mobilisée, en particulier lors des premiers cycles.

Sable lâche

Les résultats d'un essai cyclique alterné sur sable lâche ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont donnés dans les figures 3.35a à 3.35f. On note les mêmes remarques que celles observées avec le sable dense, notamment une diminution très importante des contraintes de cisaillement et normale au cours des premiers cycles.

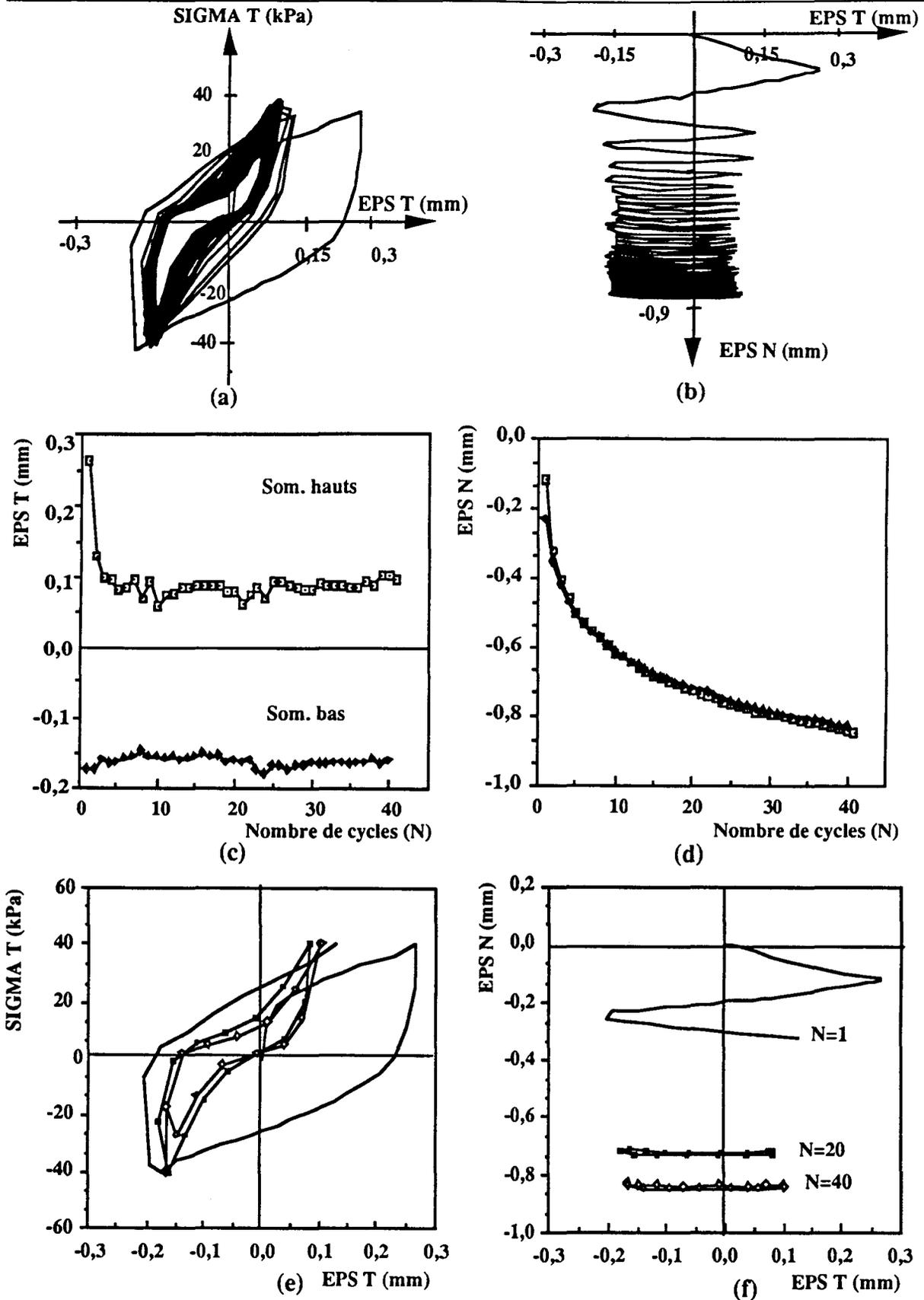


Figure : 3.33- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-40 \text{ kPa} \leq \tau \leq +40 \text{ kPa}$

Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 20 et 40)

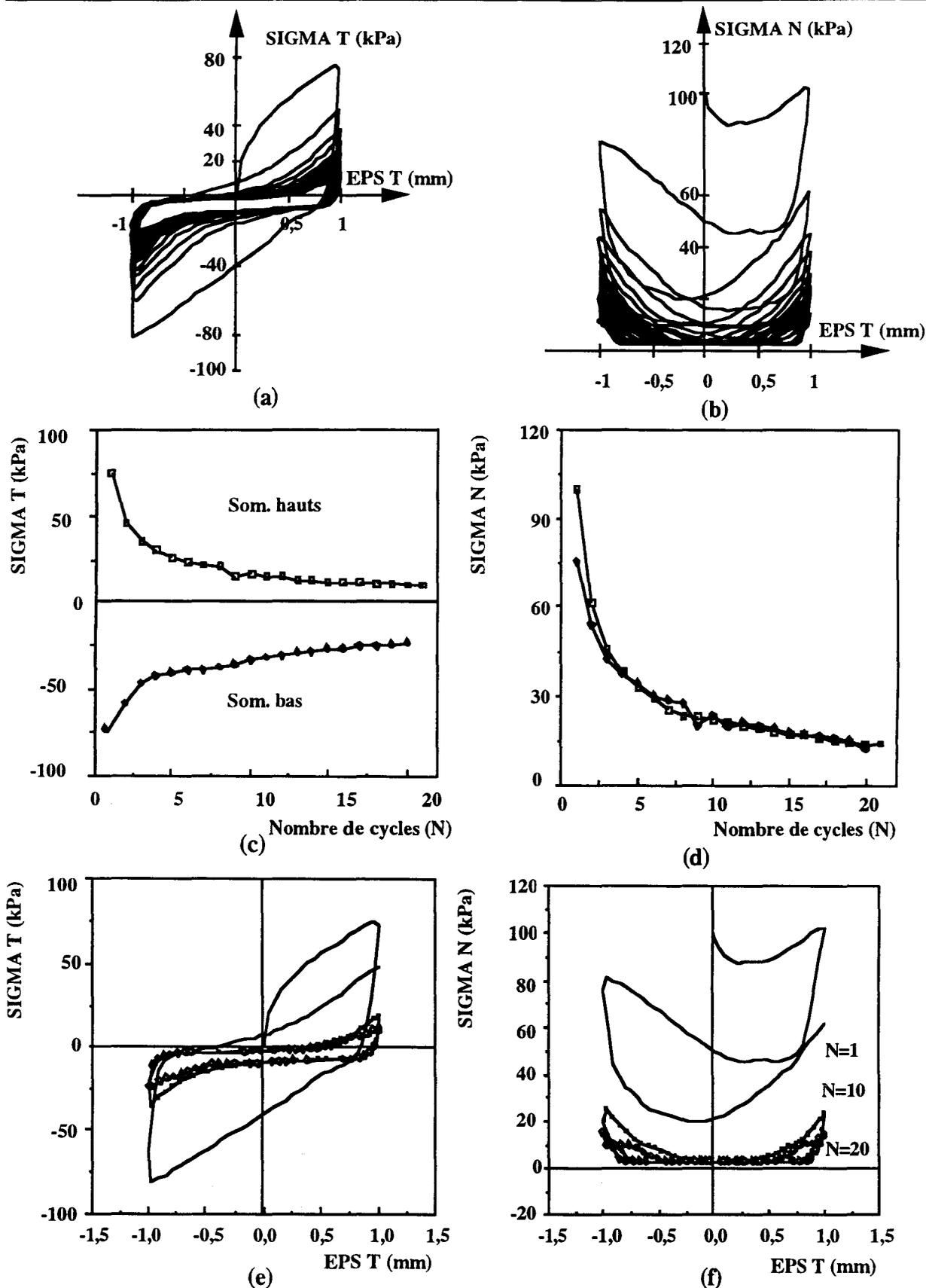


Figure : 3.34- Essai cyclique à $\epsilon_n=0, -1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

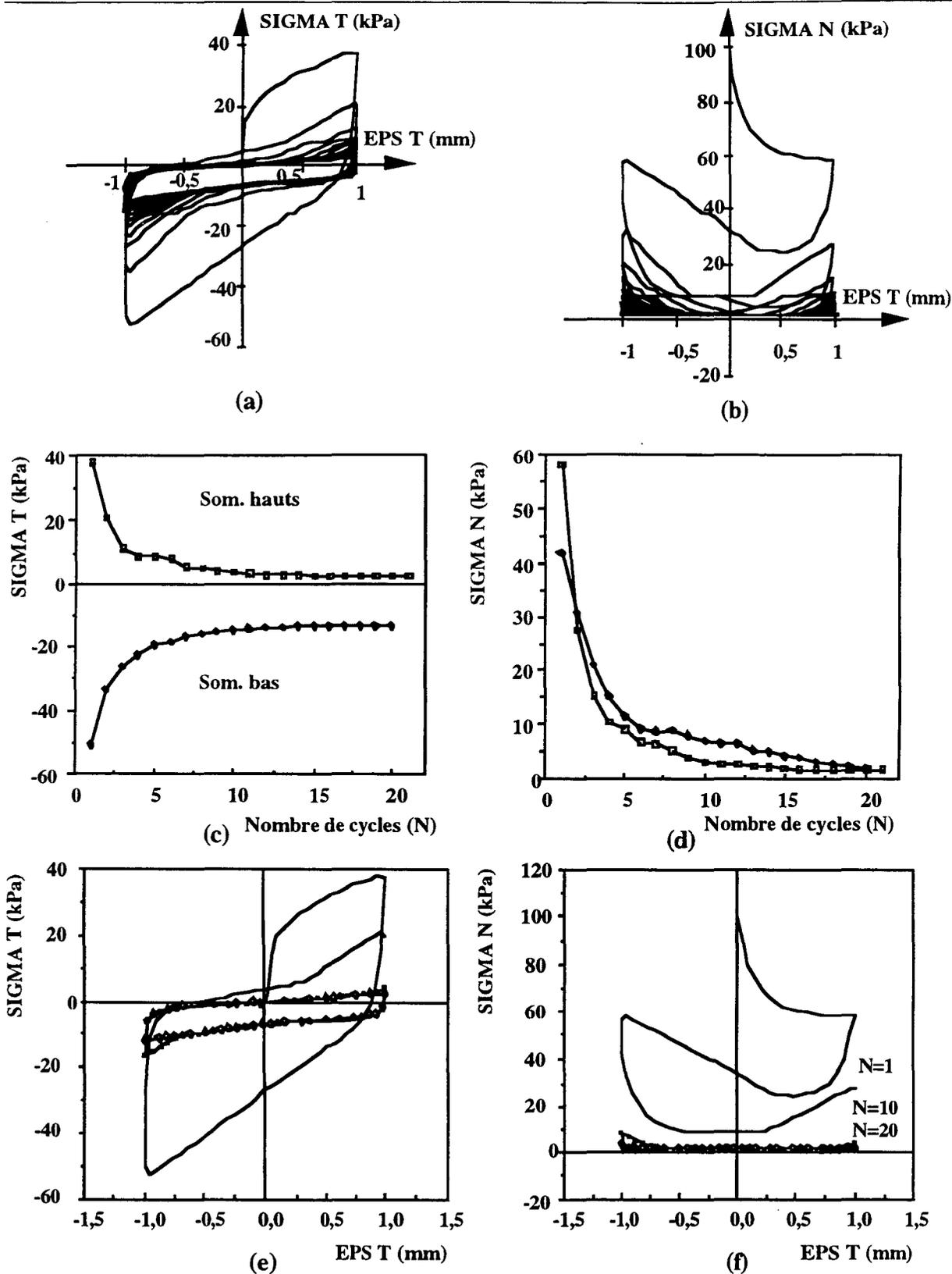


Figure : 3.35- Essai cyclique à $\varepsilon_n=0$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable Carbonaté, surface rugueuse, $D_r = 15\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

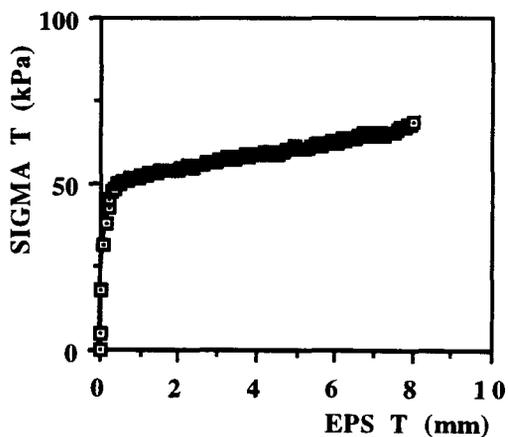
(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

3.2.2. Surface lisse

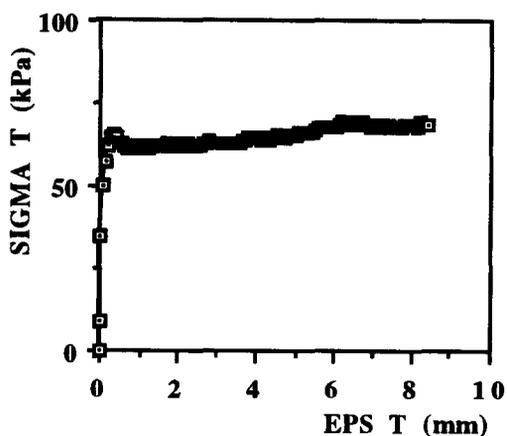
Afin de situer les niveaux de chargement cyclique retenus dans nos essais, nous donnons dans les figures 3.36a et 3.36b les résultats des essais monotones réalisés avec cette interface.

Les résultats d'un essai cyclique alterné à contrainte normale constante ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.37a à 3.37f. On constate que le chargement cyclique induit une augmentation de l'amplitude de la contrainte de cisaillement mobilisée, notamment au cours des premiers cycles. On remarque également que le comportement est contractant tout au long du chargement. Après 20 cycles, on obtient un déplacement normal de l'ordre de 0,6 mm.

Les résultats d'un essai cyclique alterné sur sable dense à déplacement normal bloqué ($-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$) sont illustrés dans les figures 3.38a à 3.38f. A chaque inversion du sens de chargement, on observe une diminution importante de la contrainte normale qui induit une réduction de la contrainte de cisaillement mobilisée.



Essai à contrainte normale constante
(Sable dense)



Essai à déplacement normal bloqué
(Sable dense)

Figure : 3.36 - Résultats des essais monotones d'interface.
(Surface lisse, sable Carbonaté)

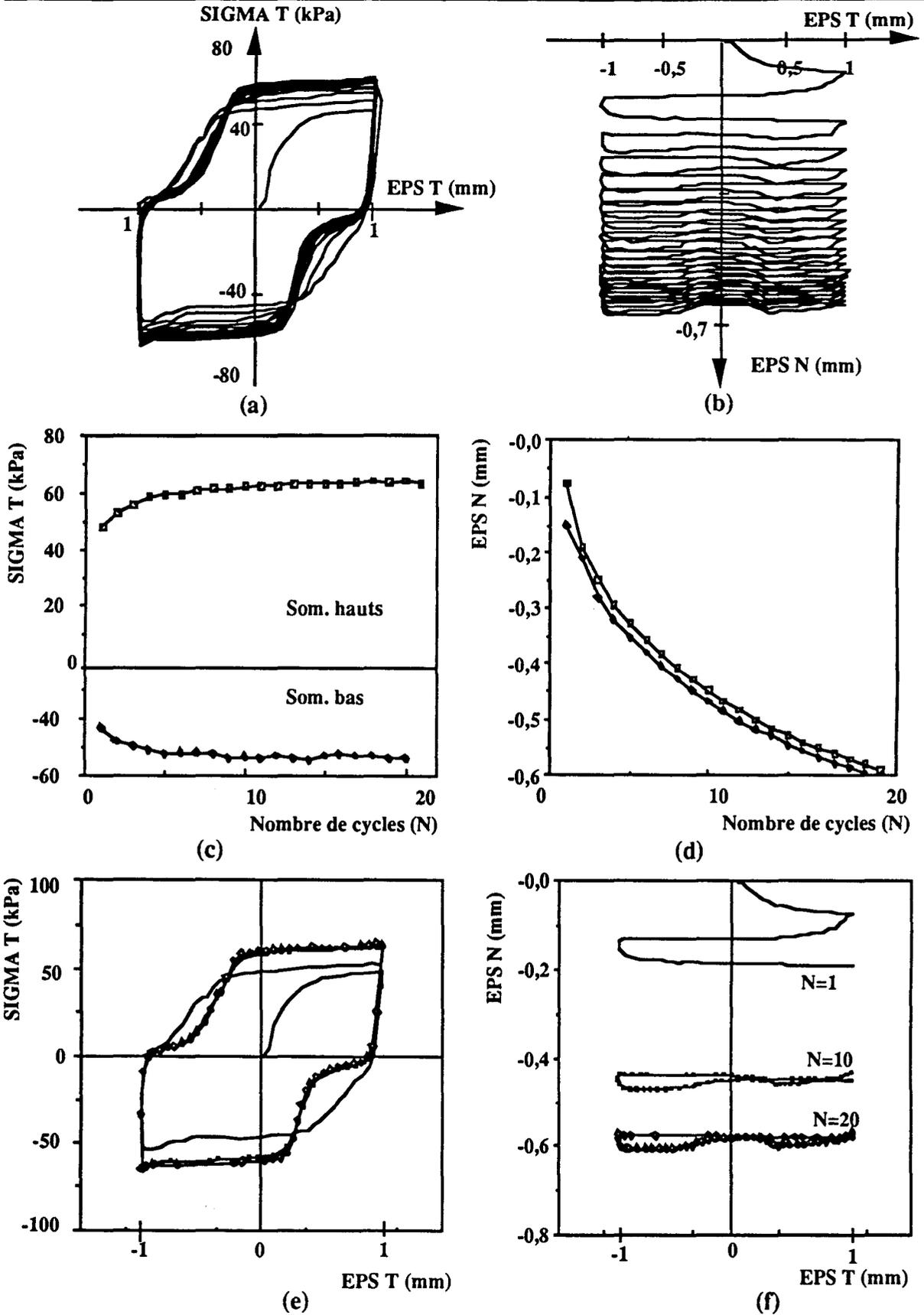


Figure : 3.37- Essai cyclique à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable Carbonaté, surface lisse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et ϵ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et ϵ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et ϵ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

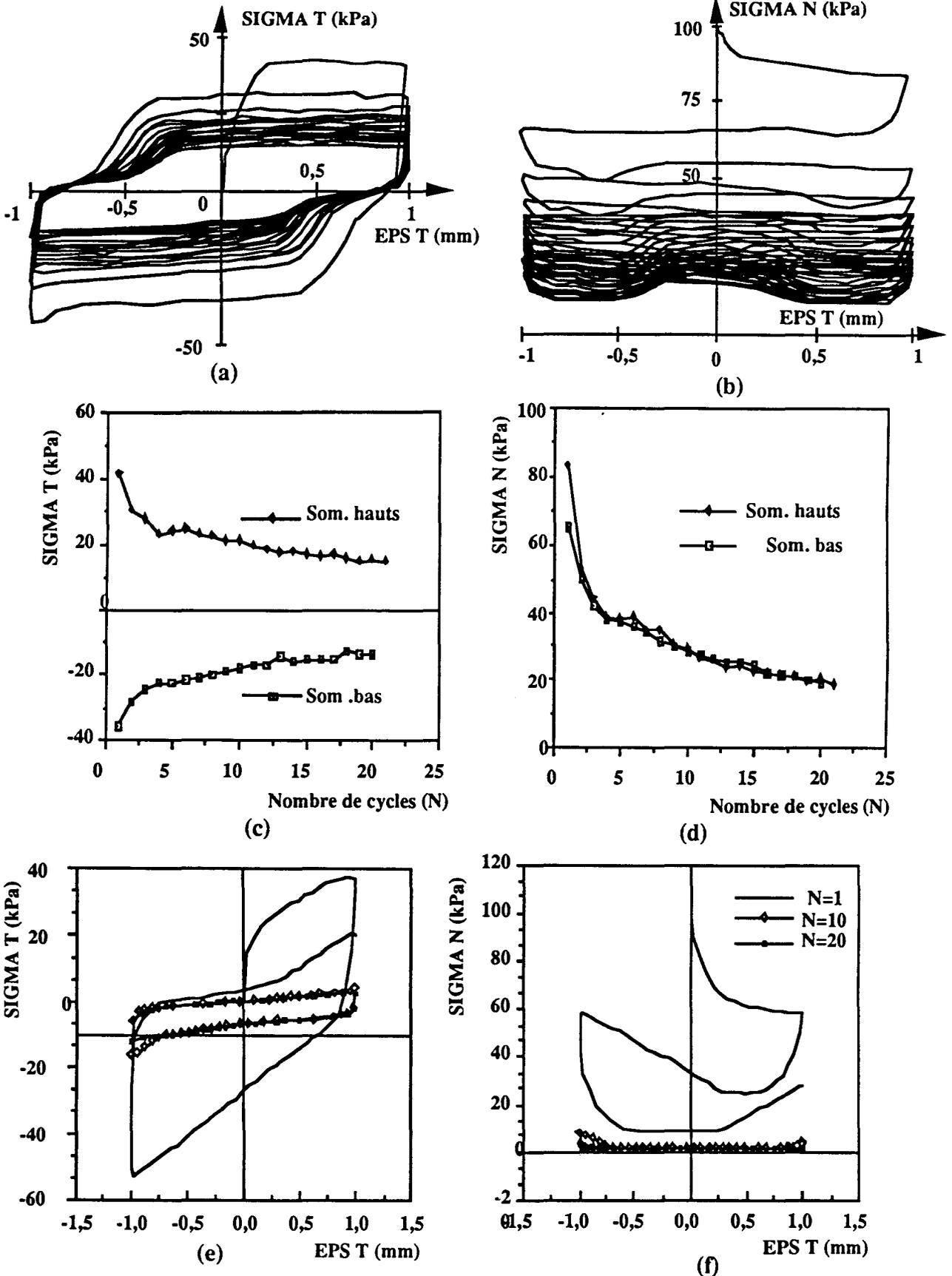


Figure : 3.38- Essai cyclique à $\varepsilon_n=0$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable Carbonaté, surface lisse, $D_r = 90\%$

(a,b: Evolution de τ et σ_n aux cours des cycles)

(c,d: Evolution de τ et σ_n aux sommets des cycles)

(e,f: τ et σ_n aux cycles: 1, 10 et 20)

3.2.3. Effet de la densité initiale et de la rugosité de la surface

Afin d'illustrer l'influence de la densité du sable et de la rugosité de la surface sur le comportement mécanique de l'interface, nous avons tracé les courbes donnant l'évolution de la contrainte de cisaillement et du déplacement normal pour les essais à contrainte normale constante (Figures 3.39 et 3.40). On peut constater que la densité initiale influence légèrement l'évolution de l'érouissage cyclique et d'une manière significative l'évolution du déplacement normal (Figures 3.39a et 3.39b).

En ce qui concerne la rugosité de la surface, on note que celle-ci affecte d'une manière significative le comportement mécanique de l'interface :

- i) l'érouissage cyclique (variation de la contrainte du cisaillement maximale) se stabilise plus rapidement avec l'interface lisse.
- ii) l'interface rugueuse induit un déplacement normal plus important.

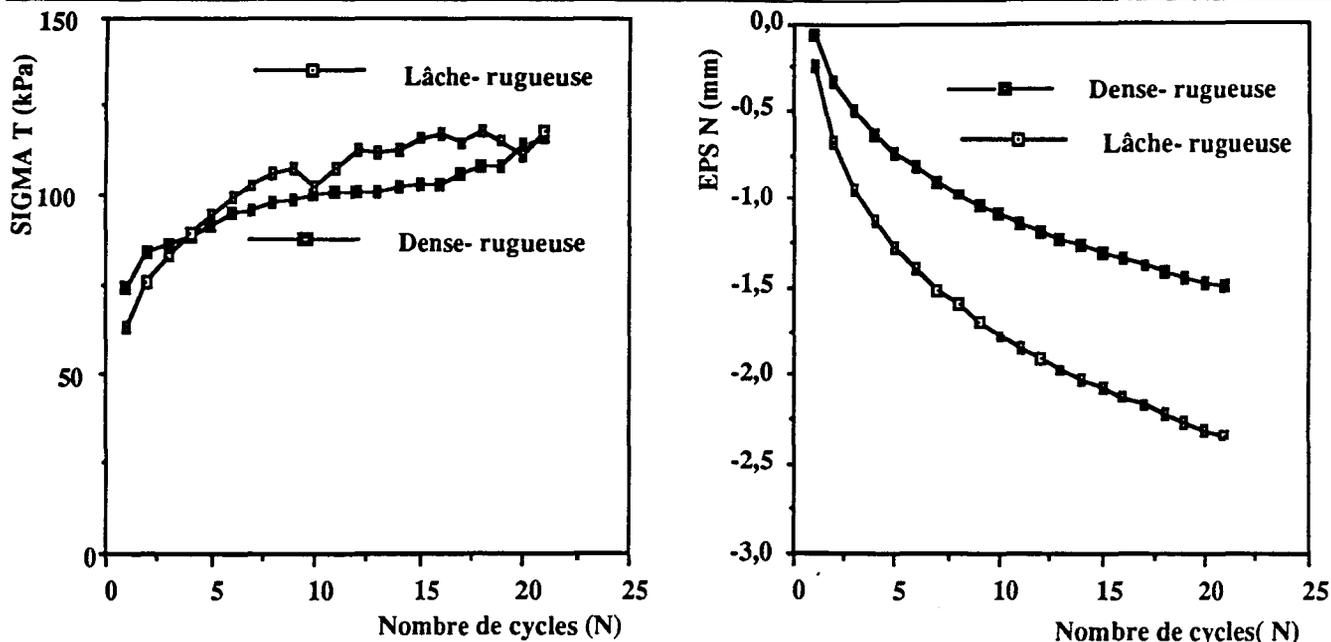


Figure : 3.39- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la densité, surface rugueuse, sable Carbonaté, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

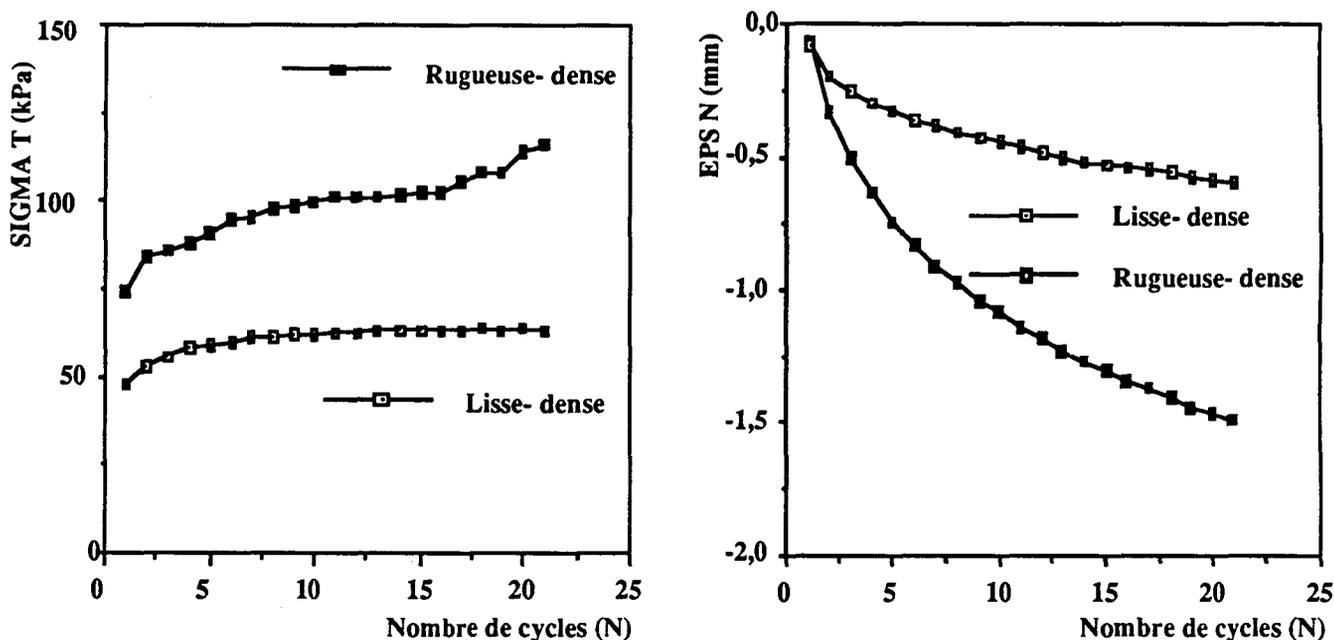


Figure : 3.40- Essais cisaillement à contrainte normale constante

Effet de la rugosité, sable Carbonaté dense ($D_r = 90\%$), $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

a: Evolution de τ aux cours des cycles

b: Evolution de ϵ_n aux cours des cycles

CHAPITRE : 4

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

.....

CHAPITRE 4 :

MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE SOLS-STRUCTURES

*Ce chapitre est composé de deux parties: la première porte sur la présentation des principaux modèles monotones proposés pour l'interface sols-structures et le modèle **MODJOIN**, développé dans notre laboratoire, suivie d'un paragraphe concernant la détermination des ses paramètres et de la sensibilité du modèle à chacun de ses paramètres. Elle se termine par le test du modèle sur des essais d'interface monotones réalisés sur le sable d'Hostun avec deux types de surface: lisse et rugueuse.*

La deuxième est consacrée à une présentation de la nouvelle version cyclique de ce modèle et de son utilisation pour la simulation des essais cycliques d'interface.

4.1. CHARGEMENT MONOTONE

4.1.1. Analyse bibliographique

La modélisation du comportement de l'interface sols-structures pose beaucoup de difficultés. Ceci est dû à la complexité de ce comportement et aux limites des dispositifs expérimentaux qui permettent son étude. Aussi, différents modèles ont été proposés. On note que les modèles proposés pour les interfaces appartiennent à l'une des deux approches :

- approche type contact et
- approche type couche mince.

Dans cette partie, nous allons présenter ces deux approches.

4.1.1.1. Approche type contact

Cette approche a fait l'objet de nombreux travaux. Parmi les principaux modèles proposés dans ce cadre, on peut citer:

- modèle de Goodman ;
- les modèles élastoplastiques avec ou sans écrouissage et
- les modèles incrémentaux.

Modèle de Goodman

Goodman et al (1968) ont proposé pour la simulation des fissures dans les roches un élément spécial d'épaisseur nulle (Figure 4.1). Cet élément est constitué de deux doublets de noeuds. Sa matrice de rigidité est formulée à partir de la minimisation de l'énergie potentielle, en substituant les déformations à l'intérieur de l'élément par les déplacements relatifs à l'interface. Le vecteur de force de liaison $\{P\}$ par unité de longueur de l'élément est donné par une loi du type :

$$\{P\} = [k]\{\Delta u\}$$

avec :

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_t \\ P_n \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \{\Delta u\} = \begin{Bmatrix} \Delta u_t \\ \Delta u_n \end{Bmatrix}$$

$[K]$ est la matrice de comportement de l'élément joint, donnée par :

$$[k] = \begin{bmatrix} k_t & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}$$

Les termes intervenant dans la matrice de rigidité sont calculés d'après les règles suivantes :

- K_t et K_n sont prises égales à zéro dans le cas d'un décollement;
- K_t prend une valeur faible dans le cas d'un glissement et
- K_n prend une valeur forte si la contrainte normale est de compression. Cette condition doit assurer la non interpénétration entre les corps en contact.

La loi de comportement de ce modèle peut être donc représentée par un critère de rupture en cisaillement (type Mohr-Coulomb, par exemple), une courbe de cisaillement reliant ΔU_t et P_t et enfin une courbe de compression donnant ΔU_n en fonction de P_n (Figure 4.2).

Goodman et al (1968) ont appliqué ce modèle au calcul d'un tunnel circulaire chargé horizontalement et verticalement. Les résultats obtenus ont montré que le comportement du tunnel dépend de l'orientation et des propriétés des joints.

Goodman et J. Dubois (1972) ont complété ce modèle par l'introduction d'une relation de dilatance pour mieux simuler certains types de fractures fermées dans les roches. Ils ont utilisé un modèle de type adaptation de la rigidité, basé sur le critère de rupture bilinéaire de Patton (Figure 4.3).

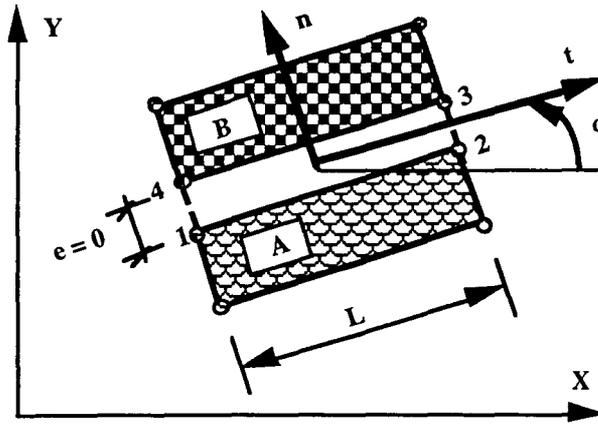
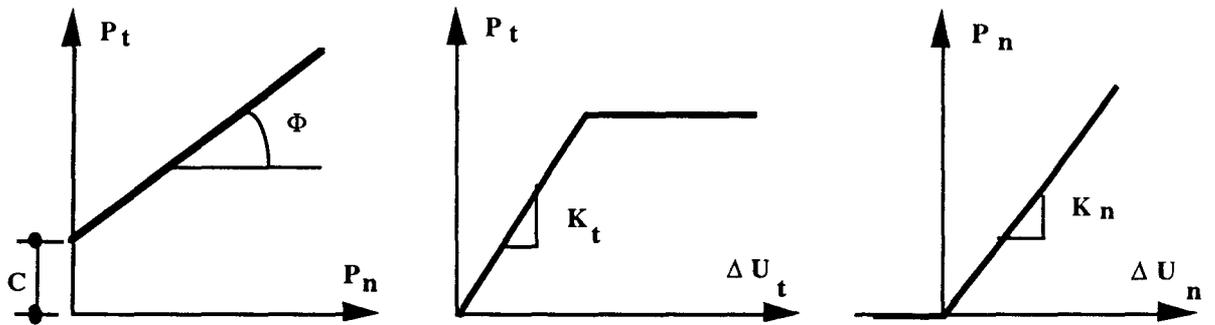


Figure : 4.1 - Elément joint de type Goodman

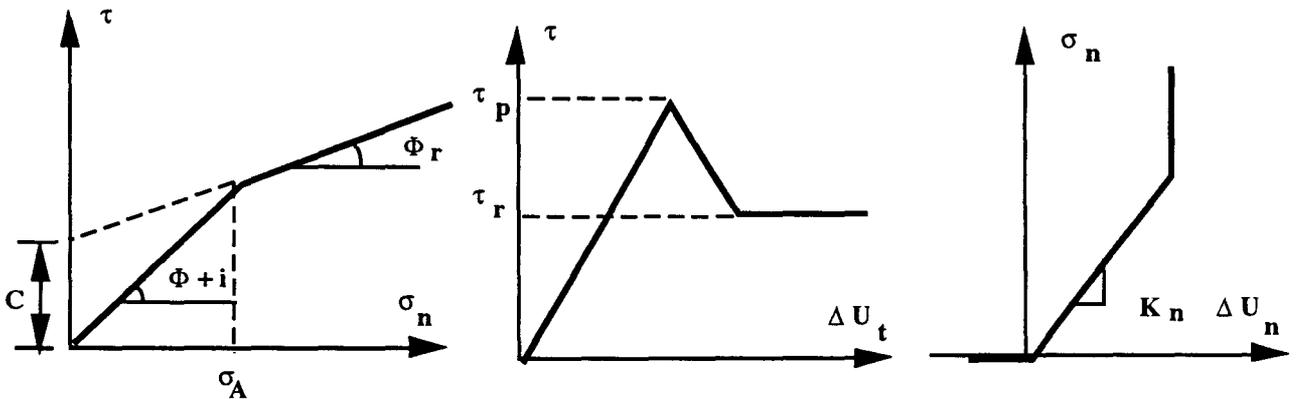


a) Critère de rupture

b) Courbe de cisaillement

c) Courbe de compression

Figure : 4.2 - Modèle de Goodman (Goodman et al, 1968)



a) Critère de Patton

b) Courbe de cisaillement multilinéaire

c) Courbe de compression

Figure : 4.3 - Deuxième modèle de Goodman (D'après Goodman et al, 1968)

Goodman et St John (1977) ont présenté une nouvelle version de ce modèle qui comprend la notion de rigidité rotationnelle qu'on peut évaluer en considérant le moment de rotation quand les noeuds de la face inférieure sont fixes et que l'on applique une force sur les noeuds de la face supérieure. Dans ce cas, des degrés de liberté supplémentaires sont introduits dans la formulation de l'élément.

Modèles élastoplastiques

Meimon et al (1981) ont utilisé, pour le calcul des fondations des plates-formes pétrolières, des éléments joints à 6 noeuds. Le comportement à l'interface, dans le sens tangentiel, est décrit par une loi élastoplastique non associée du type Mohr-Coulomb. Le glissement ou la plastification dans l'élément joint est donc gouverné par un fonction de charge f et un potentiel plastique g s'écrivant sous la forme :

$$f(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \operatorname{tg}\phi - c$$

$$g(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \operatorname{tg}\psi$$

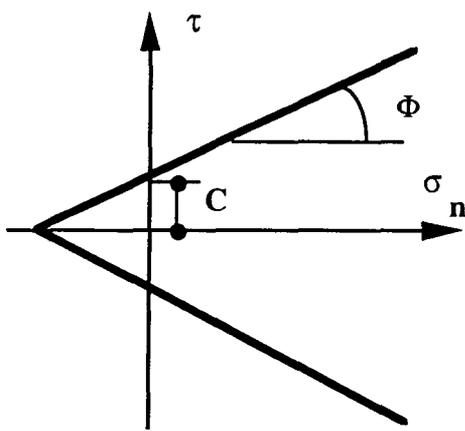
ϕ , C et ψ sont respectivement l'angle de frottement, la cohésion et l'angle de dilatance. Le principe de ce modèle est illustré dans les figures 4a à 4d.

Des modèles élastoplastiques à écrouissage ont été également proposés pour les interfaces. Parmi ces modèles, on peut citer le modèle Modjoin (Bencheikh, 1991; Shahrour et Bencheikh, 1992) développé dans notre laboratoire, le modèle avec radoucissement proposé par Ottosen et Olsson (1988) et celui proposé par Boulon et Nova (1990).

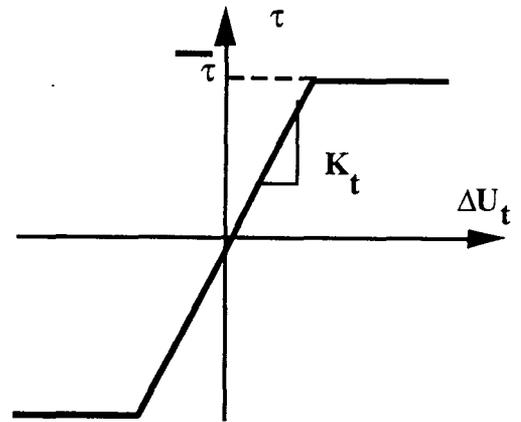
La figure 4.5 montre une simulation à l'aide des modèles Boulon et Nova (1990) des essais d'interface réalisés par Plytas (1985). On peut constater que ce modèle décrit correctement le comportement de l'interface pour les faibles niveaux de déplacement tangentiel relatif ($|\gamma| \leq 5$ mm).

Modèles incrémentaux

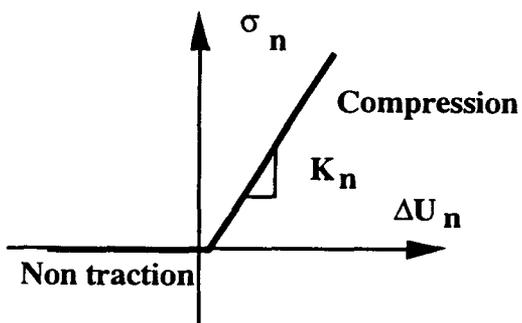
Le formalisme incrémental a permis de simuler le comportement post-pic (la phase contractante) lié à la rupture des grains dans les matériaux pulvérulents. Les principaux travaux développés dans ce cadre sont ceux du laboratoire 3S de Grenoble (Boulon et Darve, 1977; Boulon et al, 1988; Rouainia et al, 1992 et Garnica, 1993). Les auteurs ont développé une loi vectorielle bidimensionnelle à dépendance directionnelle pour le comportement de l'interface.



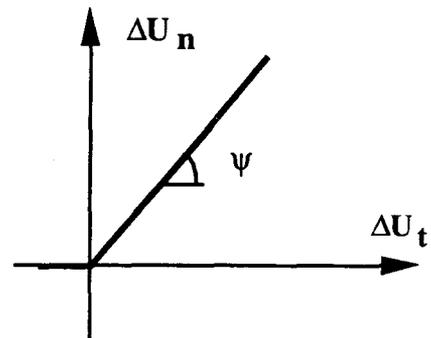
a) Critère de rupture



b) Comportement à $\sigma_n = \text{Cste}$



c) Comportement en compression- traction



d) Dilatance

Figure : 4.4 - Modèle de Mohr-Coulomb

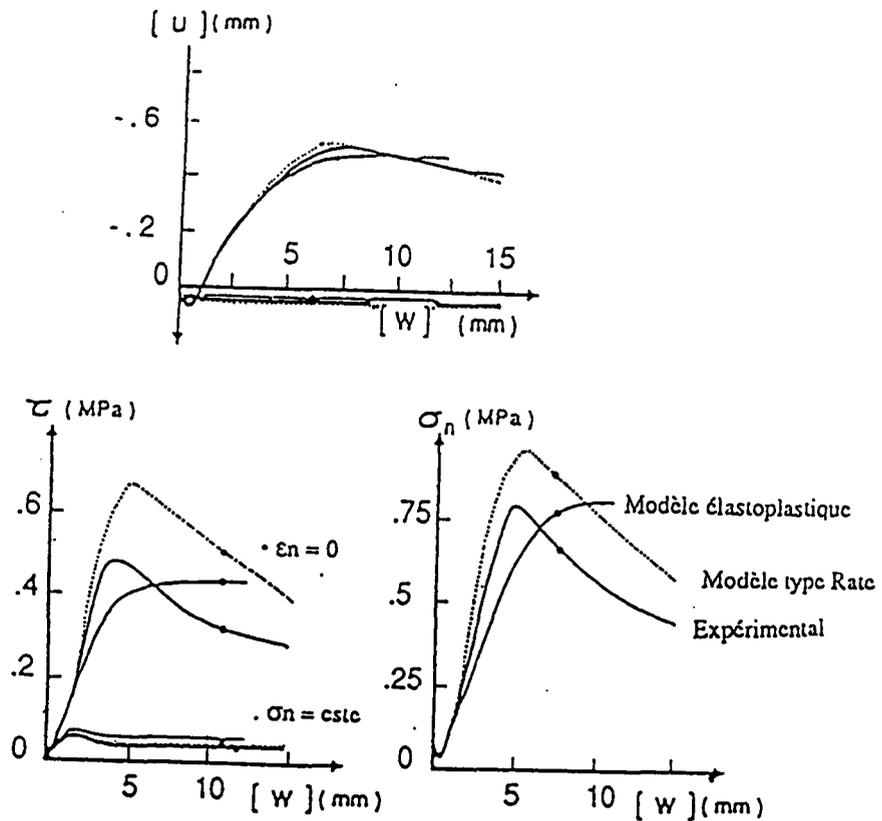


Figure : 4.5 - Tests de calibration à contrainte normale constante et à déplacement normal bloqué. (Sable d'Hostun moyennement dense, $\sigma_{n0} = 56$ kPa).

(D'après Boulon et Nova, 1990)

4.1.1.2. *Approche type couche mince*

Certains auteurs (Ghaboussi, 1973; Pande, 1978 et Desai, 1984) ont proposé l'introduction de la notion de déformations aux éléments joints, ceci en assignant une certaine épaisseur à l'interface. L'utilisation de ce type d'éléments est justifiée par le fait que la zone d'interface représente un domaine de faible épaisseur (cas des joints ou des défauts remplis dans les masses rocheuses et des zones d'interface sols-structures) qui est généralement soumis à de fortes sollicitations de cisaillement. Ils ont alors adopté des modèles rhéologiques propres à ces zones.

Ghaboussi et al (1973) ont développé un élément joint avec une faible épaisseur (comparée aux dimensions des éléments massifs adjacents) et ont présenté la construction explicite de la matrice de rigidité de l'élément d'interface pour les problèmes plans et axisymétriques.

En s'inspirant des travaux de Zienkiewicz (1971) et de Ghaboussi (1973), Pande et Sharma (1978) ont proposé un élément joint mince comportant les déplacements relatifs à l'interface comme degrés de liberté indépendants. Ce comportement a été décrit par un modèle élastoplastique non associé basé sur le critère de Mohr-Coulomb.

Notons les travaux de Desai et Zaman (1984) et de Zaman (1984) qui ont proposé des éléments plan et tri-dimensionnel, adaptés aux problèmes d'interaction sols-structures et aux joints dans les roches.

4.1.2. Présentation du modèle MODJOIN

Le modèle d'interface Modjoin (Bencheikh, 1991; Shahrour et Bencheikh, 1992) est basé sur l'élastoplasticité. Selon cette théorie, l'incrément de déplacement relatif entre deux corps est décomposé en une contribution élastique $d\epsilon^e$ et une contribution plastique $d\epsilon^P$:

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^P$$

4.1.2.1. Comportement élastique

Le comportement élastique est décrit sous la forme :

$$d\sigma_n = K d\epsilon_n^e$$

$$d\tau = G d\epsilon_t^e$$

K et G sont respectivement les modules normal et de cisaillement. Ces deux modules varient en fonction de la contrainte normale appliquée selon les relations suivantes :

$$K = K_0 \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{0,5}$$

$$G = G_0 \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{0,5}$$

K_0 et G_0 sont des paramètres du modèle et P_a est une pression de référence.

4.1.2.2. Partie plastique

Le critère de rupture adopté est de type **MOHR - COULOMB**. Il est défini dans le plan (σ_n, τ) par :

$$f(\sigma_n, \tau) = |\tau| - (\sigma_n + C) M_f$$

avec :

$$C = c \cdot \cot \phi$$

$$M_f = \tan \phi$$

C et ϕ représentent respectivement la cohésion et l'angle de frottement de l'interface.

La surface de charge est définie dans le plan (σ_n, τ) par deux droites. Son expression est donnée par :

$$f_m = |\tau| - M_f(C + \sigma_n) R_m$$

où R_m est une fonction d'érouissage.

La figure 4.6 illustre la surface de charge et la surface de rupture.

La fonction d'érouissage R_m est supposée dépendre du déplacement tangentiel relatif plastique ε_t^P :

$$R_m = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_t^P}{\beta \left(\frac{\sigma_{n0}}{p_a} \right) + \varepsilon_t^P} + A \left(\varepsilon_t^P \right)^2 \cdot e^{-B \varepsilon_t^P}$$

Où α , β , A et B sont des paramètres du modèle.

On note que l'expression précédente fait apparaître un terme hyperbolique et un autre exponentiel. Le premier croît avec le déplacement tangentiel relatif plastique et il tend vers α pour les grandes valeurs de ce déplacement. Le deuxième diminue avec le déplacement tangentiel relatif plastique et tend vers zéro pour les grandes valeurs de ce déplacement.

La figure 4.7 montre l'allure de la fonction d'érouissage pour un sable dense et un sable lâche.

4.1.2.3. Règle d'écoulement

L'incrément du déplacement relatif plastique dérive d'un potentiel plastique g :

$$\dot{\varepsilon}^P = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma}$$

où λ est le multiplicateur de plasticité.

Le potentiel plastique g adopté dans le modèle est de type non-associé du fait que la normalité ne permet pas de faire apparaître la phase contractante. Le lieu des points où ε_n change de signe (passage du domaine contractant au domaine dilatant) peut être approximé par une droite appelée droite d'état caractéristique (Luong, 1979) et ayant comme expression :

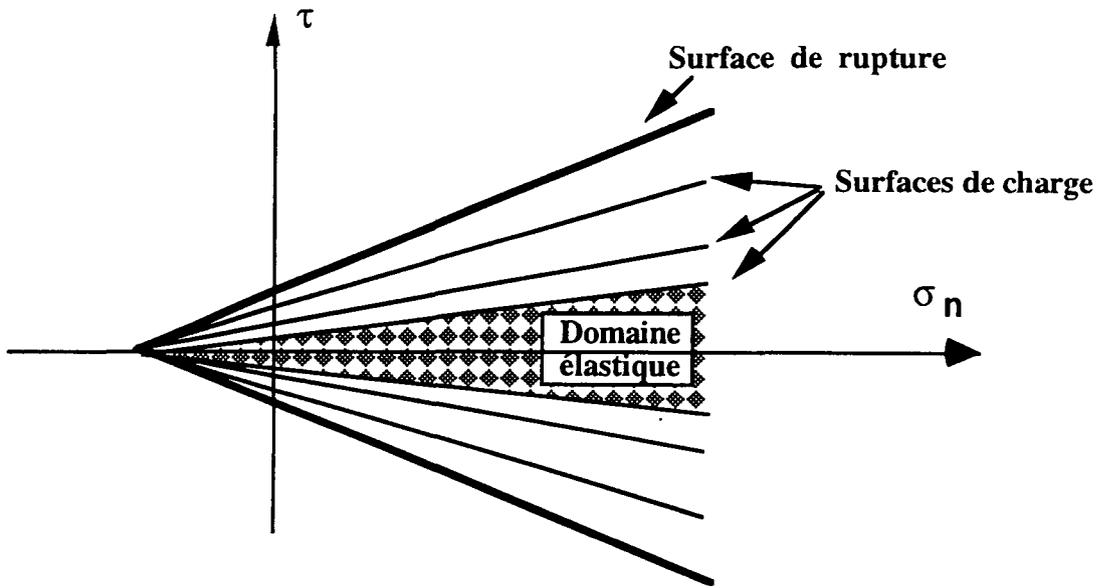


Figure : 4.6 - Forme des surfaces de charge et de rupture

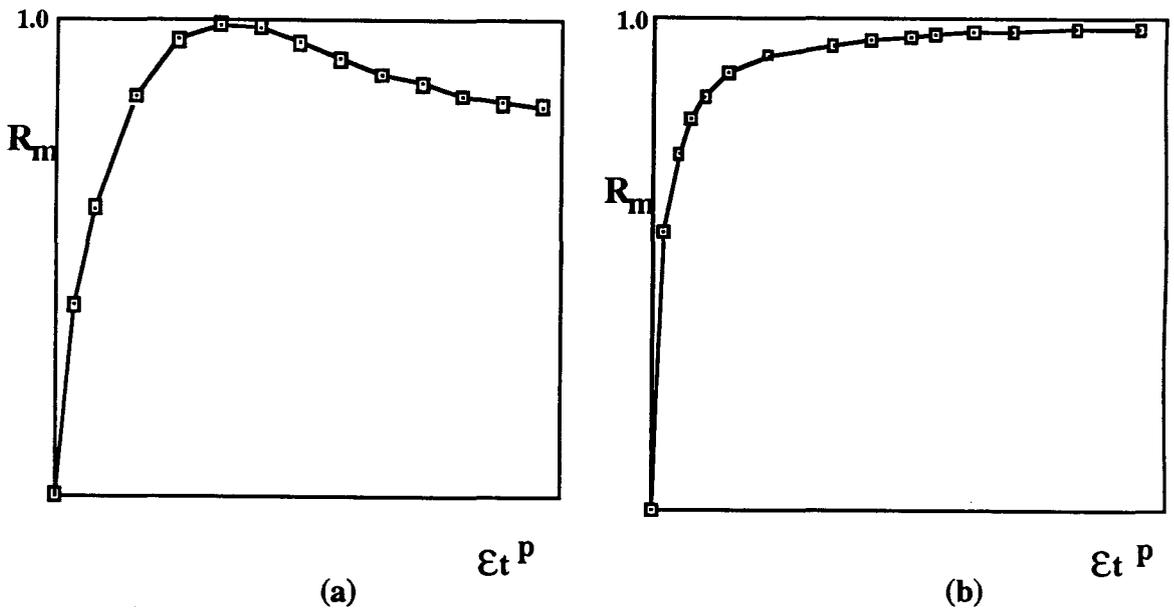


Figure : 4.7 - Evolution de la fonction d'écroissage R_m en fonction de ϵ_t^P

- a - Sable dense
- b - Sable lâche

$$\tau = M_g \cdot \sigma_n$$

avec :

$$M_g = \text{tg } \psi$$

où ψ est un nouveau paramètre du modèle.

La figure 4.8 met en évidence la position de cette droite par rapport à la surface de rupture.

Le gradient du potentiel retenu est de la forme :

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_n} = \left(M_g - \frac{|\tau|}{\sigma_n} \right) A_g$$

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = 1$$

avec :

$$A_g = e^{-a_g \cdot \epsilon_i^p}$$

Ce terme permet d'assurer la stabilisation du déplacement normal pour les grandes valeurs du déplacement tangentiel relatif.

a_g est un nouveau paramètre du modèle.

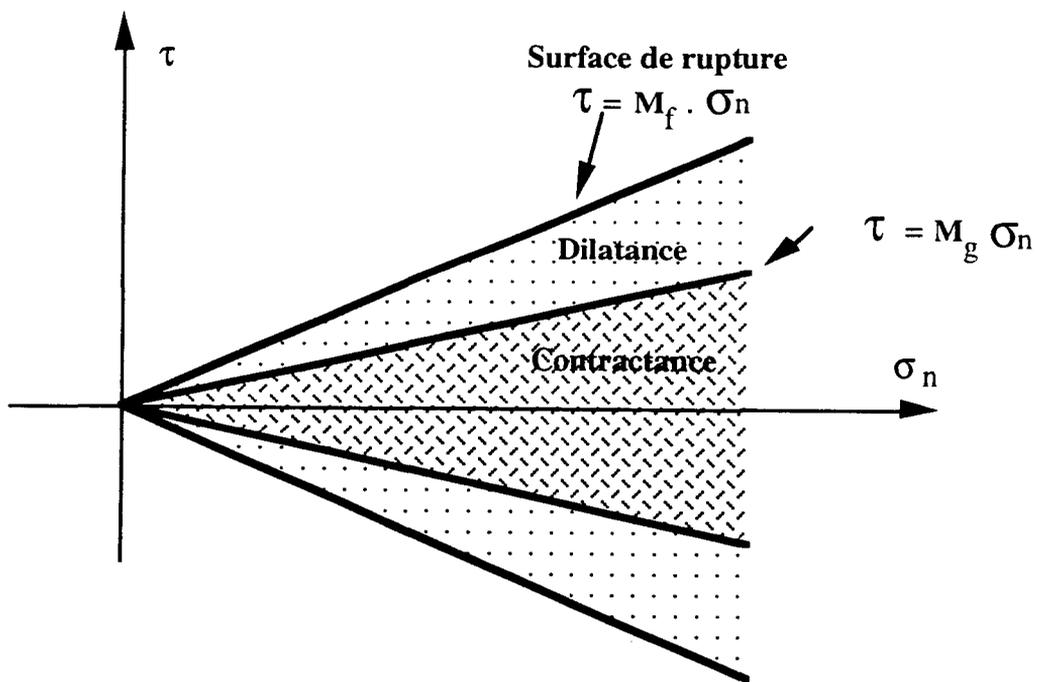


Figure : 4.8 - Forme de la droite caractéristique

4.1.3. Détermination des paramètres

4.1.3.1. Paramètres élastiques K_0 et G_0

Le module de cisaillement G représente la pente initiale de la courbe (τ, ϵ_t) . A partir des essais à différentes contraintes normales initiales, on détermine la pente initiale (G_i), puis, on procède à une régression linéaire sur les points $\left[G_i, \left(\frac{\sigma_{n_i}}{P_a} \right)^{0,5} \right]$ pour déterminer la valeur de G_0 (Figure 4.9).

K_0 est déterminé à partir d'un essai de compression d'interface ou éventuellement par calage sur des essais à déplacement normal bloqué. L'influence de ce paramètre sur la simulation d'un essai à déplacement normal bloqué est illustrée dans la figure 4.10. On note qu'un accroissement de la valeur de K_0 amplifie la variation de la contrainte normale. Dans le cas d'un sol dilatant, cet accroissement amplifie la contrainte normale ainsi que la contrainte de cisaillement. Par contre, lorsque le comportement est contractant, un tel accroissement diminue les deux contraintes.

4.1.3.2. Paramètres plastiques

Les paramètres ϕ et c

On détermine l'angle de frottement et la cohésion par régression linéaire sur les points (σ_n, τ) à la rupture (Figure 4.11).

Les paramètres α et β

On détermine α à partir de la contrainte de cisaillement au pic (τ_{pic}) et de la contrainte de cisaillement limite (τ_{lim}) (Figure 4.12). Son expression est donnée par :

$$\alpha = \frac{\tau_{lim}}{\tau_{pic}}$$

Une valeur approchée du paramètre β peut être déterminée à partir de la condition de continuité de la courbe contrainte - déformation entre la phase élastique et la phase élastoplastique. En supposant que cette courbe évolue de la même façon que la fonction d'écrouissage, on a :

$$\left(\frac{d\tau}{d\epsilon_t^P} \right)_{\epsilon_t^P=0} = \sigma_n \operatorname{tg}\phi \left(\frac{dR_m}{d\epsilon_t^P} \right)_{\epsilon_t^P=0}$$

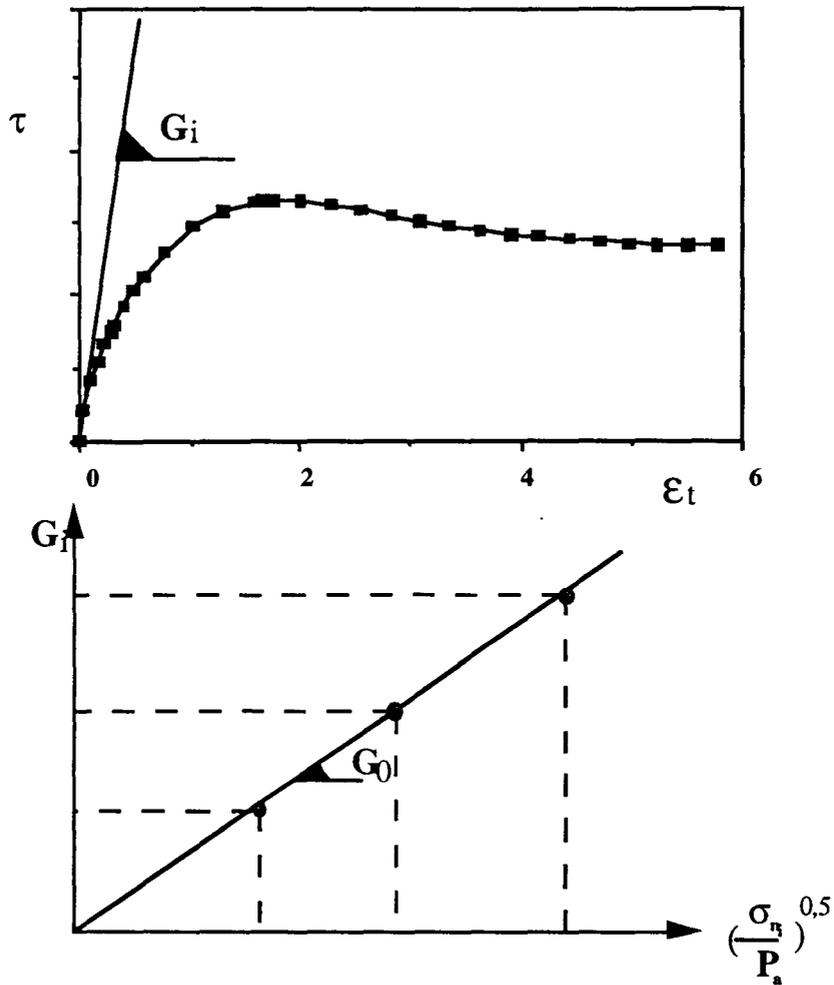


Figure : 4.9 - Détermination du paramètre G_0

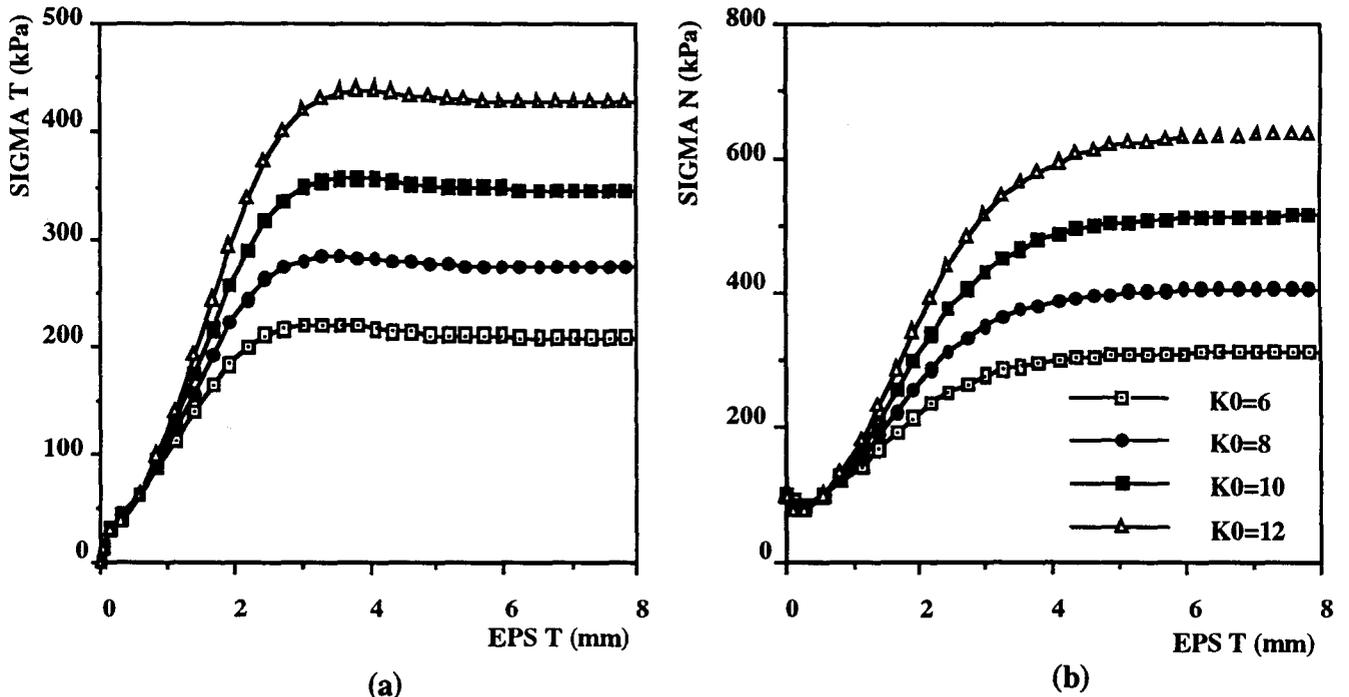


Figure : 4.10- Effet du paramètre K_0 (sable dense)

a et b : chemin à déplacement normal bloqué

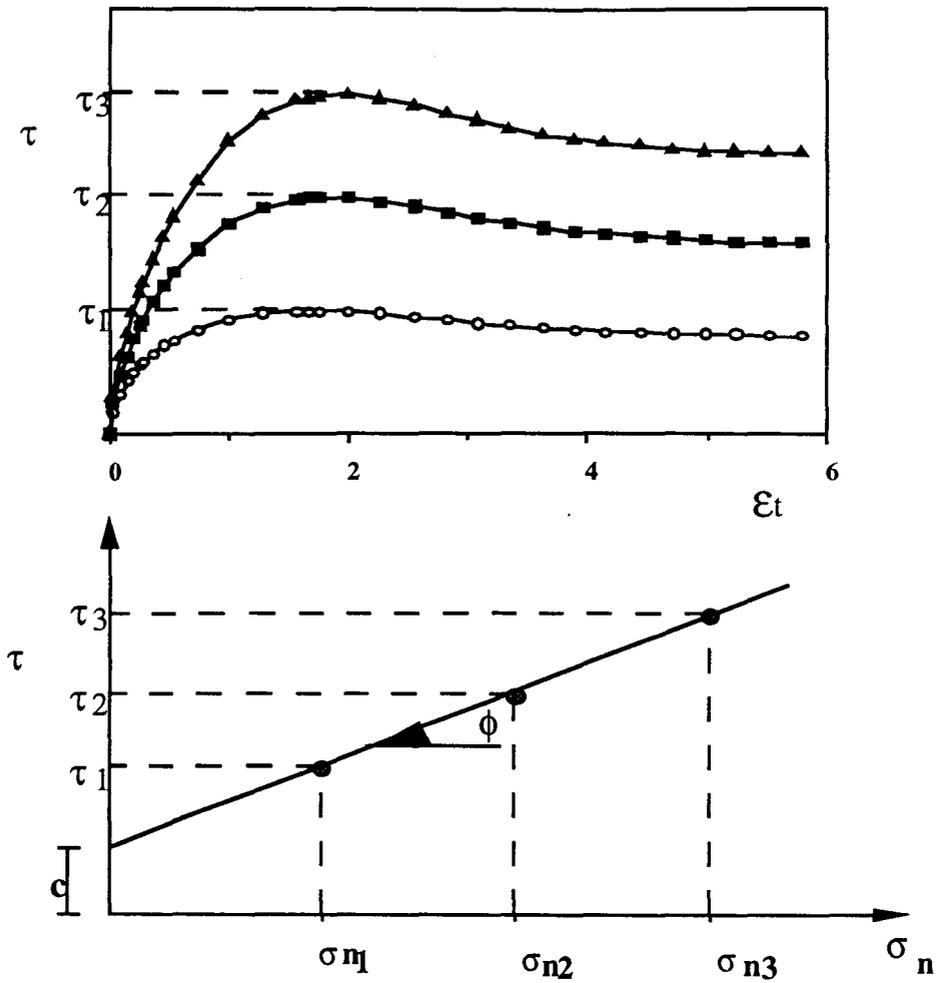


Figure : 4.11 - Détermination des paramètres ϕ et c

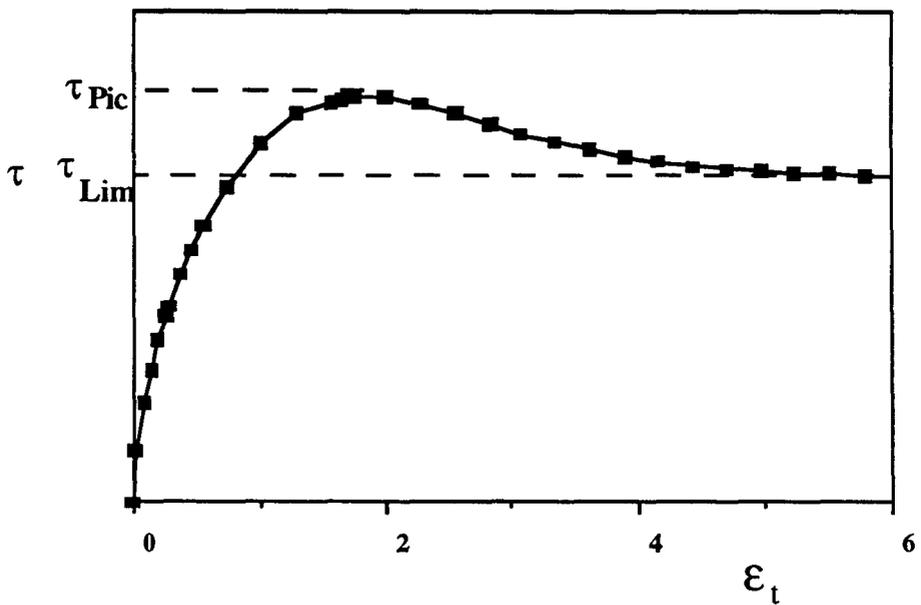


Figure : 4.12 - Détermination du paramètre α

En remplaçant les deux termes par leurs valeurs, on obtient :

$$\beta = \frac{\sigma_n \alpha P_a \operatorname{tg} \phi}{G_e}$$

où G_e est la valeur du module de cisaillement en ce point.

Cette valeur peut être ensuite améliorée par calage sur la courbe expérimentale.

L'influence du paramètre α sur la simulation d'un essai à contrainte normale constante est illustrée dans la figure 4.13. On constate qu'un accroissement de ce paramètre affecte essentiellement la valeur de la contrainte de cisaillement au pic.

La figure 4.14 montre l'influence du paramètre β sur la simulation d'un essai à contrainte normale constante. On note que ce paramètre influence la raideur de la phase pré-pic. Celle-ci décroît avec l'augmentation de β .

Les paramètres A et B

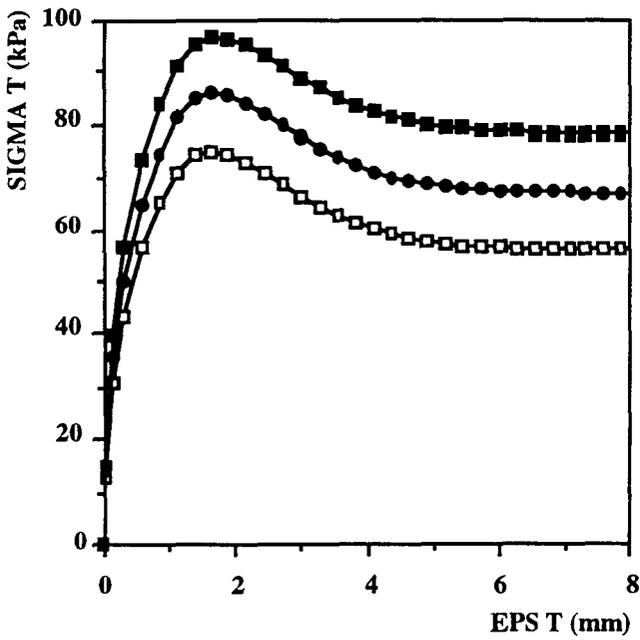
Les paramètres **A** et **B** sont déterminés à partir des courbes de cisaillement en considérant qu'au pic ($\varepsilon_t^P = \bar{\gamma}$) $R_m = 1$ et $\dot{R}_m = 0$. En dérivant R_m par rapport à ε_t^P et en vérifiant la condition précédente, on obtient :

$$B = \frac{2}{\bar{\gamma}} + \frac{\alpha \beta \frac{\sigma_{n0}}{P_a}}{\left(\beta \frac{\sigma_{n0}}{P_a} + \bar{\gamma} \right) \left[1 - \frac{\alpha \bar{\gamma}}{\beta \frac{\sigma_{n0}}{P_a} + \bar{\gamma}} \right]}$$

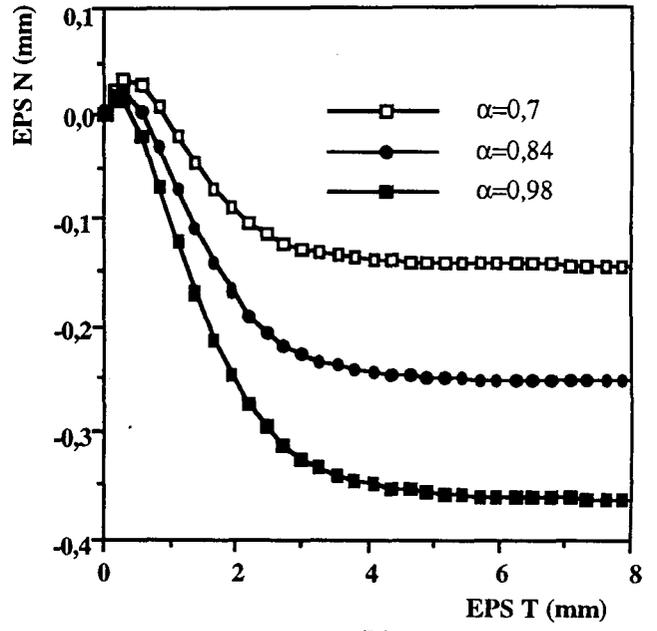
$$A = \frac{\alpha \beta \left(\frac{\sigma_{n0}}{P_a} \right) e^{B\bar{\gamma}}}{(\beta\gamma - 2) \bar{\gamma} \left[\beta \frac{\sigma_{n0}}{P_a} + \bar{\gamma} \right]^2}$$

$\bar{\gamma}$ est la valeur du déplacement relatif tangentiel au pic.

L'influence du paramètre **A** sur la simulation d'un essai à contrainte normale constante est illustrée dans la figure 4.15. On note que son augmentation provoque un accroissement de la contrainte de cisaillement au niveau du pic. Ceci affecte l'évolution du déplacement normal par une amplification du domaine de dilatance.



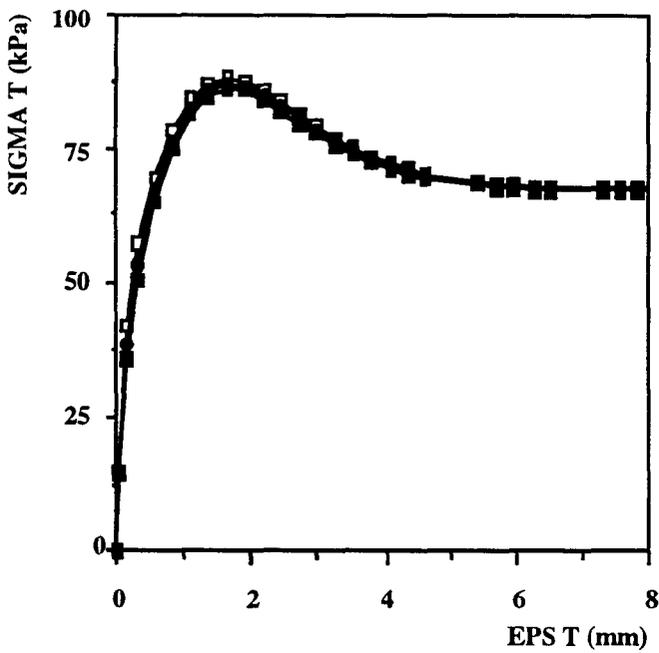
(a)



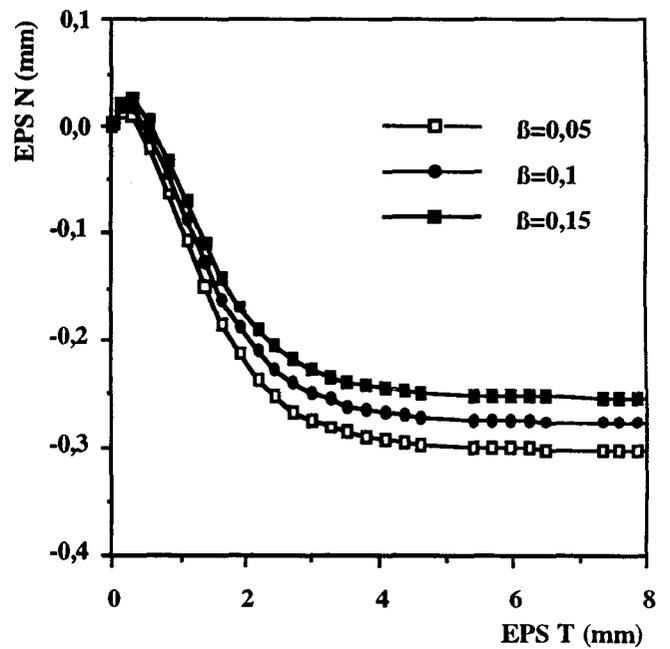
(b)

Figure : 4.13- Effet du paramètre α

a et b : chemin à contrainte normale constante



(a)



(b)

Figure : 4.14- Effet du paramètre β

a et b : chemin à contrainte normale constante

La figure 4.16 montre l'influence du paramètre **B** sur la simulation d'un essai à contrainte normale constante. On constate que ce paramètre affecte la phase post-pic. En effet, son augmentation réduit le taux du radoucissement et diminue le niveau du déplacement relatif tangentiel correspondant au pic.

Les paramètres ψ et a_g

Le paramètre ψ est déterminé par régression linéaire sur les points (σ_n , τ) correspondant au changement de phase (contractant - dilatant), c'est à dire les points pour lesquels $\dot{\varepsilon}_n = 0$ (Figure 4.17).

Le paramètre a_g est déterminé par calage sur les courbes expérimentales. La figure 4.18 montre l'influence de ce paramètre sur la simulation d'un essai à contrainte normale constante. On note qu'il influence essentiellement la partie post-pic de la courbe d'évolution de la contrainte normale. Son accroissement accélère la stabilisation du déplacement normal.

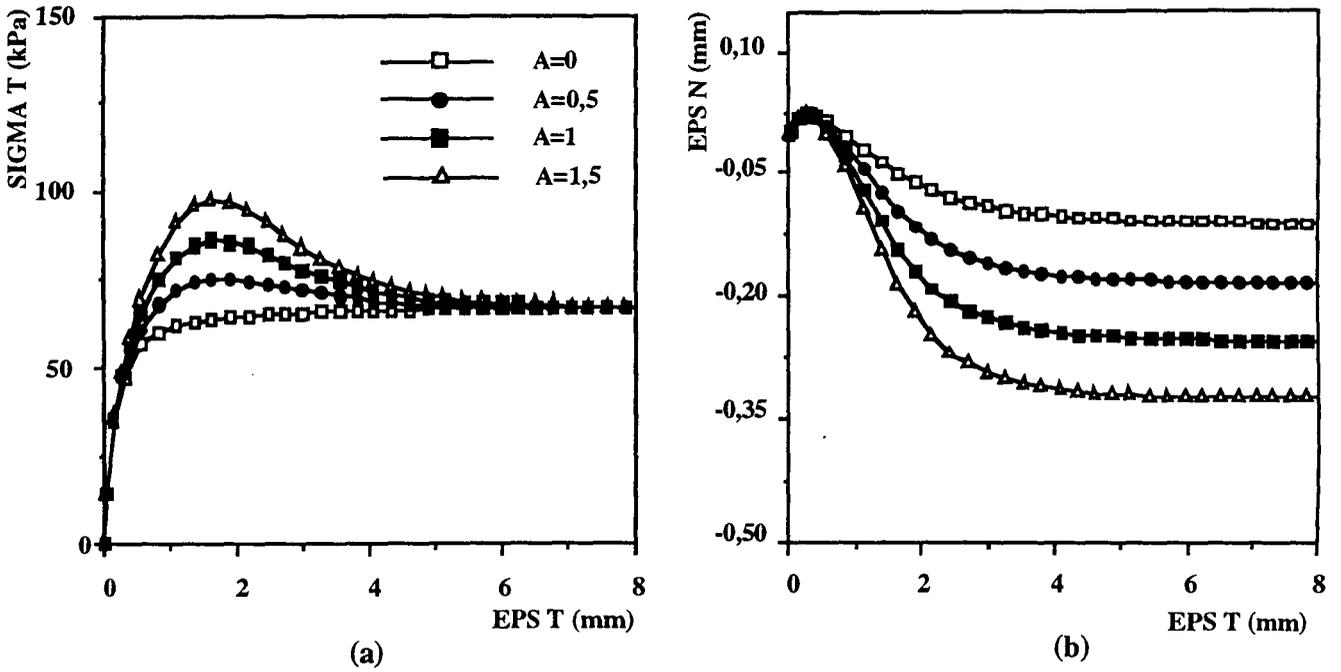


Figure : 4.15- Effet du paramètre A

a et b : chemin à contrainte normale constante

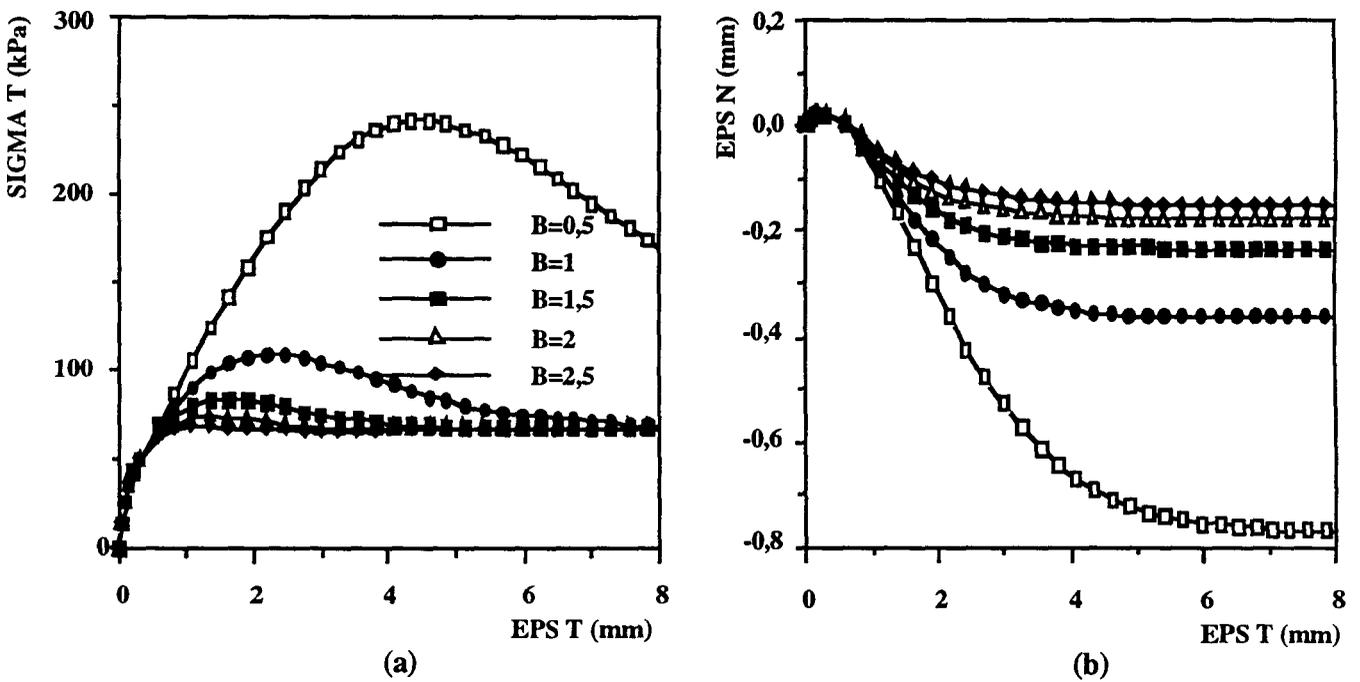


Figure : 4.16- Effet du paramètre B

a et b : chemin à contrainte normale constante

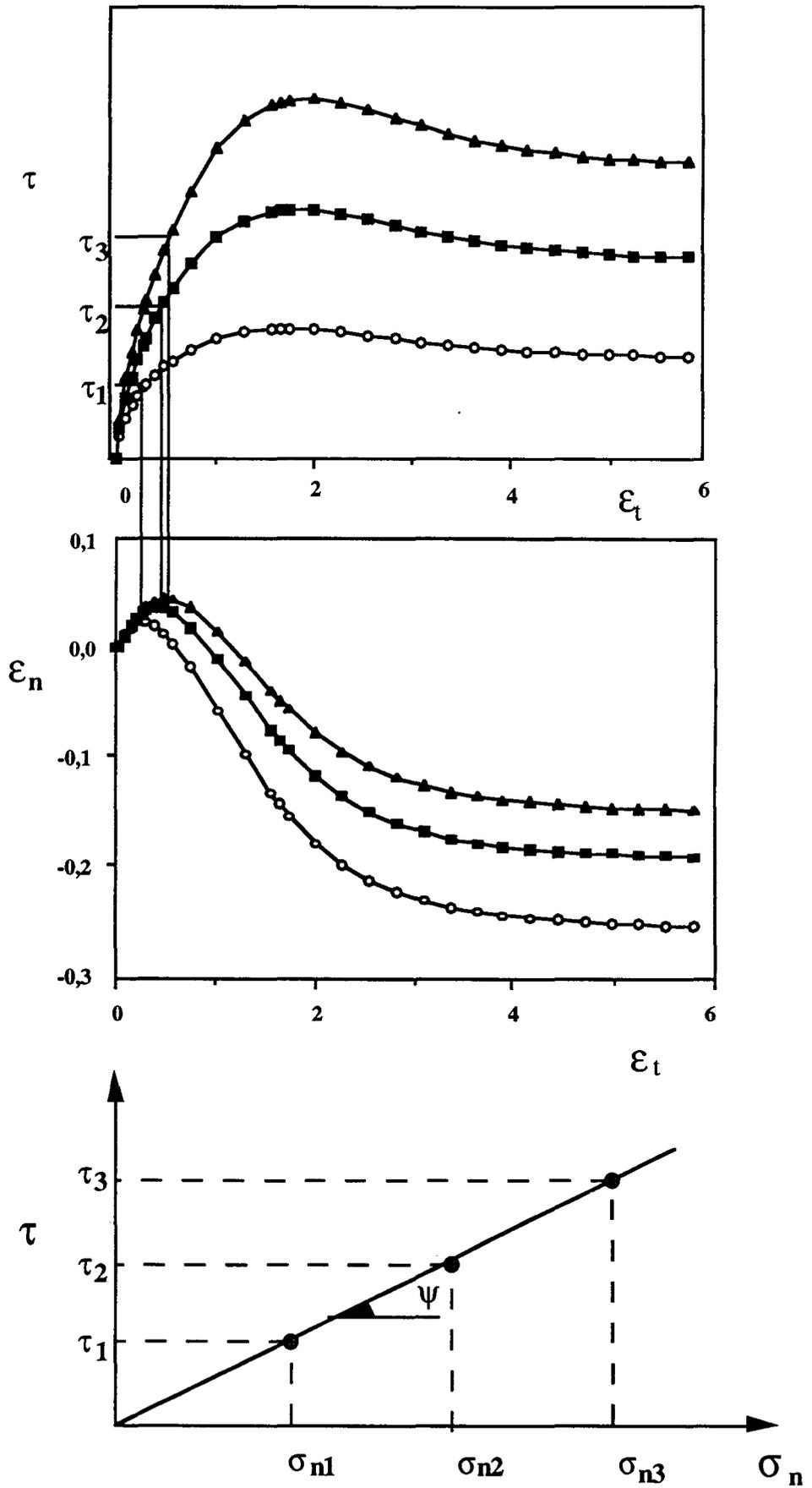


Figure : 4.17 - Détermination du paramètre ψ

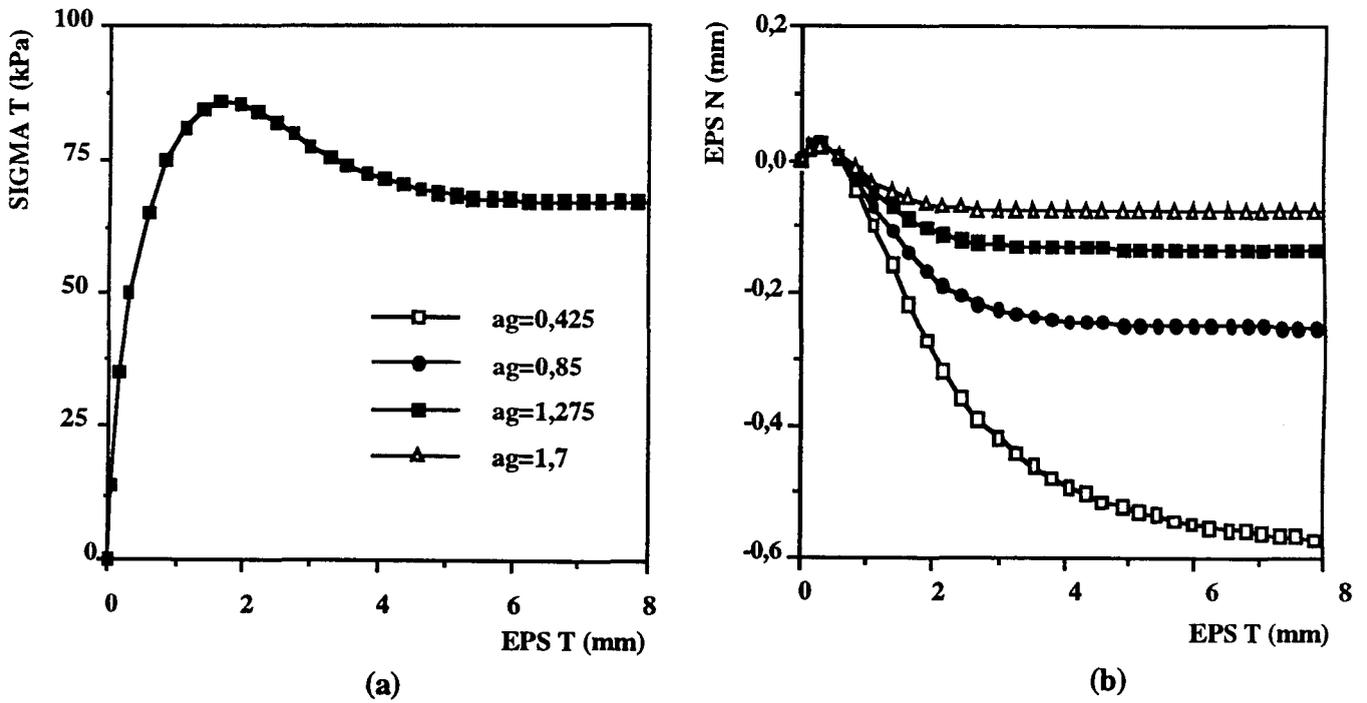


Figure : 4.18- Effet du paramètre ag (sable dense)

a et b : chemin à contrainte normale constante

4.1.4. Simulation des essais d'interface

Dans cette section, nous présentons l'utilisation du modèle **Modjoin** pour la simulation des essais réalisés avec du sable d'Hostun. Après une détermination des paramètres de ce modèle à partir des essais à contrainte normale constante, il est testé sur les essais à déplacement normal bloqué.

Les paramètres du modèle ont été déterminés d'après la méthodologie présentée dans la section précédente. Les jeux de paramètres trouvés sont donnés dans le tableau 4.1. Nous allons, ci-après, présenter la reproduction des essais d'identification et les tests de vérification.

4.1.4.1. Sable dense

Surface rugueuse

Les figures 4.19a et 4.19b montrent les résultats de simulation des trois essais à contrainte normale constante. On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement et reproduit bien le pic et le radoucissement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, le modèle décrit correctement la première partie de l'essai, mais, il ne produit pas la phase de contractance observée en fin d'essai.

Les figures 4.20a et 4.20b illustrent les résultats de vérification du modèle sur les essais à déplacement normal bloqué. On constate que le modèle reproduit bien ces essais, en particulier celui réalisé à 200 kPa.

Surface lisse

Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures 4.21a et 4.21b). On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement et du déplacement normal.

Le modèle a été testé sur des essais réalisés à déplacement normal bloqué ($\sigma_{n0} = 100$ et 200 kPa). Les résultats de simulation sont donnés dans les figures 4.22a et 4.22b. On constate que le modèle reproduit correctement l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la contrainte normale.

Paramètres Essais	K (100kPa/mm)	G (100kPa/mm)	$\Phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	α	β	A	B	a_g
Lisse-lâche	3	4	24	30	1	0,04	0	0	0,75
Rugueuse-lâche	4	5	32	37	1	0,06	0	0	0,55
Lisse-dense	6	4	29	26	1	0,01	0	0	0,85
Rugueuse-dense	8	5	39	25	0,84	0,1	1	1,4	0,85

Tableau : 4.1 - Paramètres du modèle monotone déterminés à partir des essais à $\sigma_n = \text{Cste}$

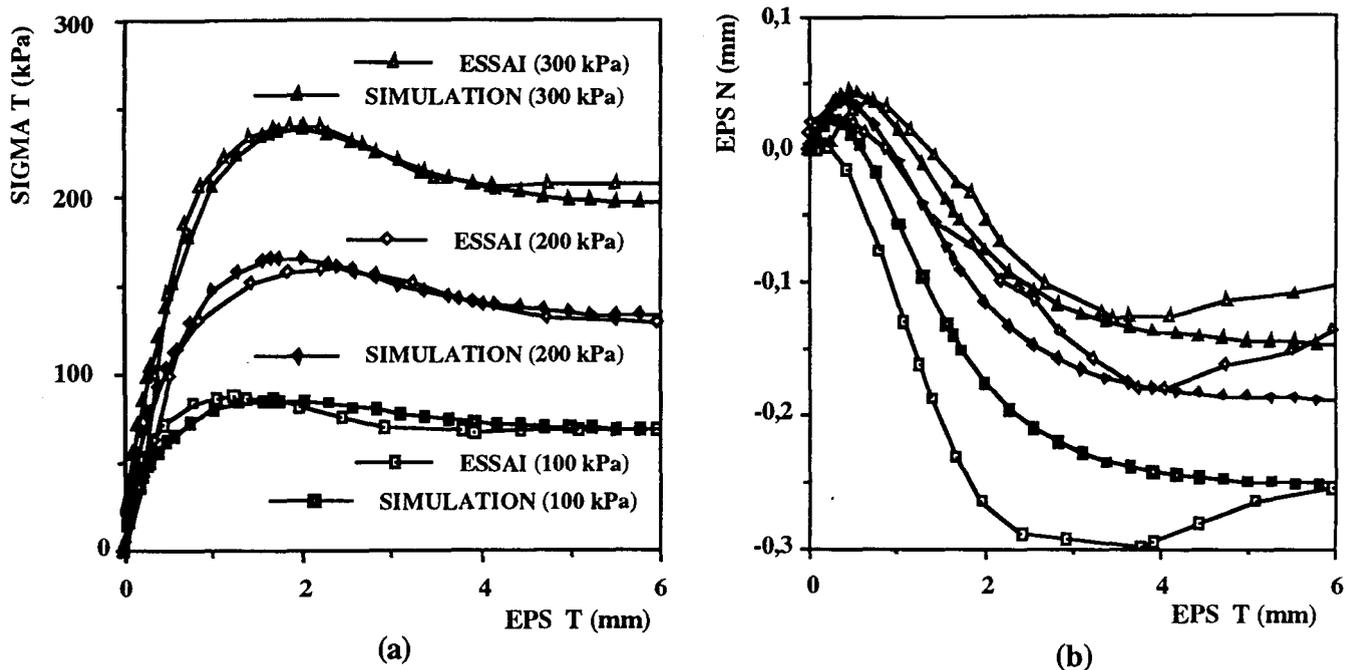


Figure : 4.19- Simulation des essais à contrainte normale constante

Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement
b : Evolution du déplacement normal

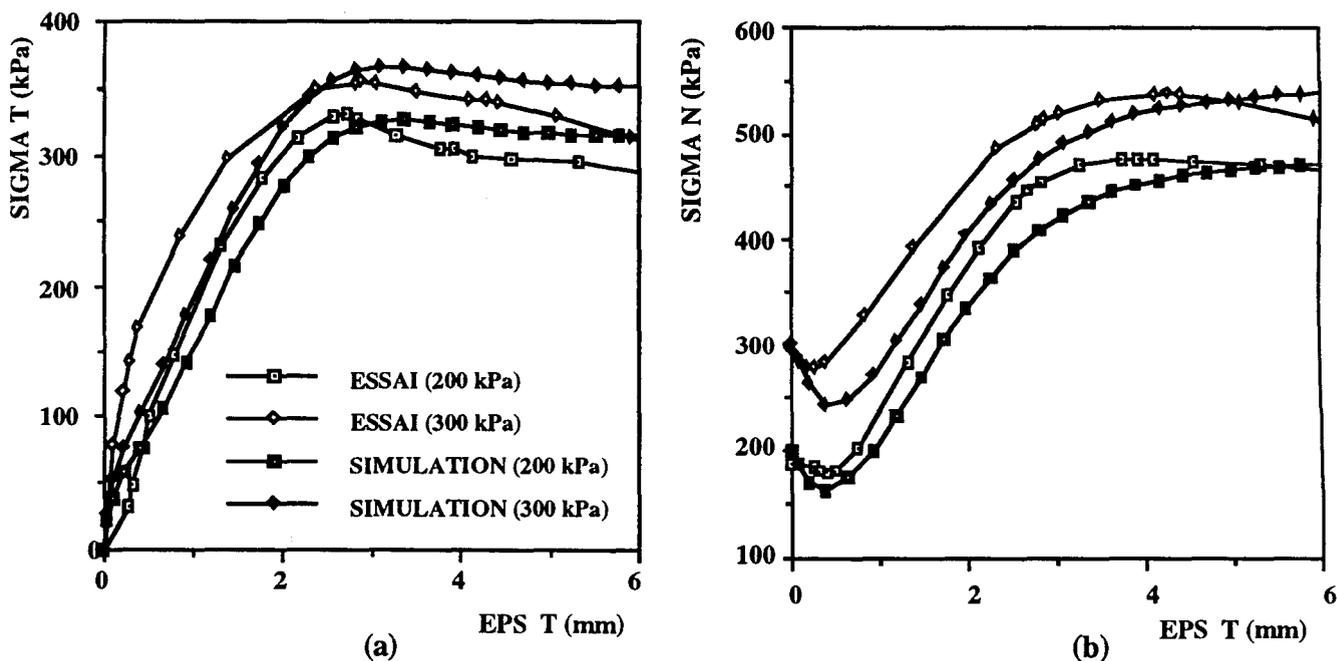


Figure : 4.20- Simulation des essais à déplacement normal bloqué

Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement
b : Evolution de la contrainte normale

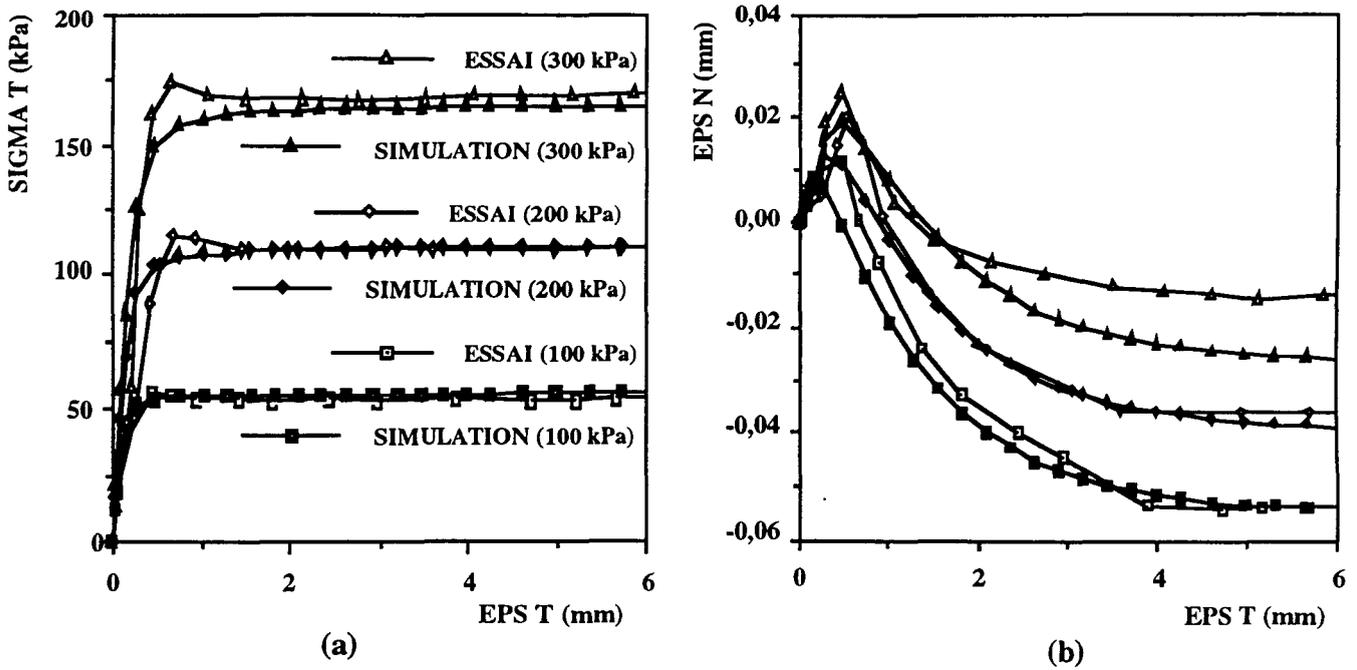


Figure : 4.21- Simulation des essais à contrainte normale constante

Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

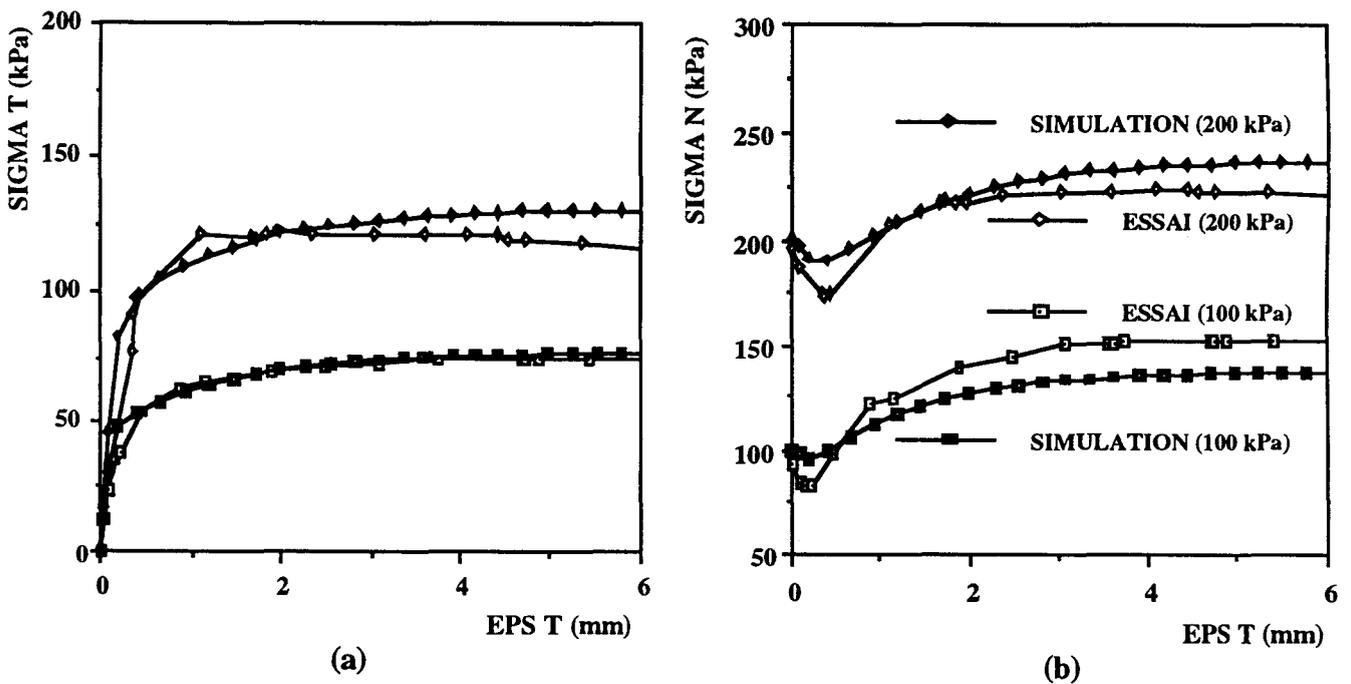


Figure : 4.22- Simulation des essais à déplacement normal bloqué

Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution de la contrainte normale

4.1.4.2. Sable lâche

Surface rugueuse

Nous avons reproduit les essais utilisés pour la détermination des paramètres du modèle (Figures 4.23a et 4.23b). On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement. En ce qui concerne l'évolution du déplacement normal, on note que le modèle reproduit bien la première partie ($\epsilon_t \leq 2,5$ mm), mais ensuite, il prédit une stabilisation qui n'a pas été observée expérimentalement.

Les figures 4.24a et 4.24b montrent les résultats de la validation du modèle sur les essais à déplacement normal bloqué. On constate que le modèle prédit bien la première phase de l'essai (pré-pic), mais par la suite, il prédit une diminution progressive de la contrainte de cisaillement jusqu'à la stabilisation, alors qu'au niveau expérimental, on note une phase de stabilisation après le pic suivie par une diminution de la contrainte de cisaillement.

Surface lisse

Les figures 4.25a et 4.25b 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 remarque que les prédictions du modèle sont sensibles à la contrainte normale initiale, ce qui induit un écart entre les courbes expérimentales et de simulation.

Le modèle a été testé sur les essais à déplacement normal bloqué. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 4.26a et 4.26b. On constate que le modèle reproduit bien ces essais.

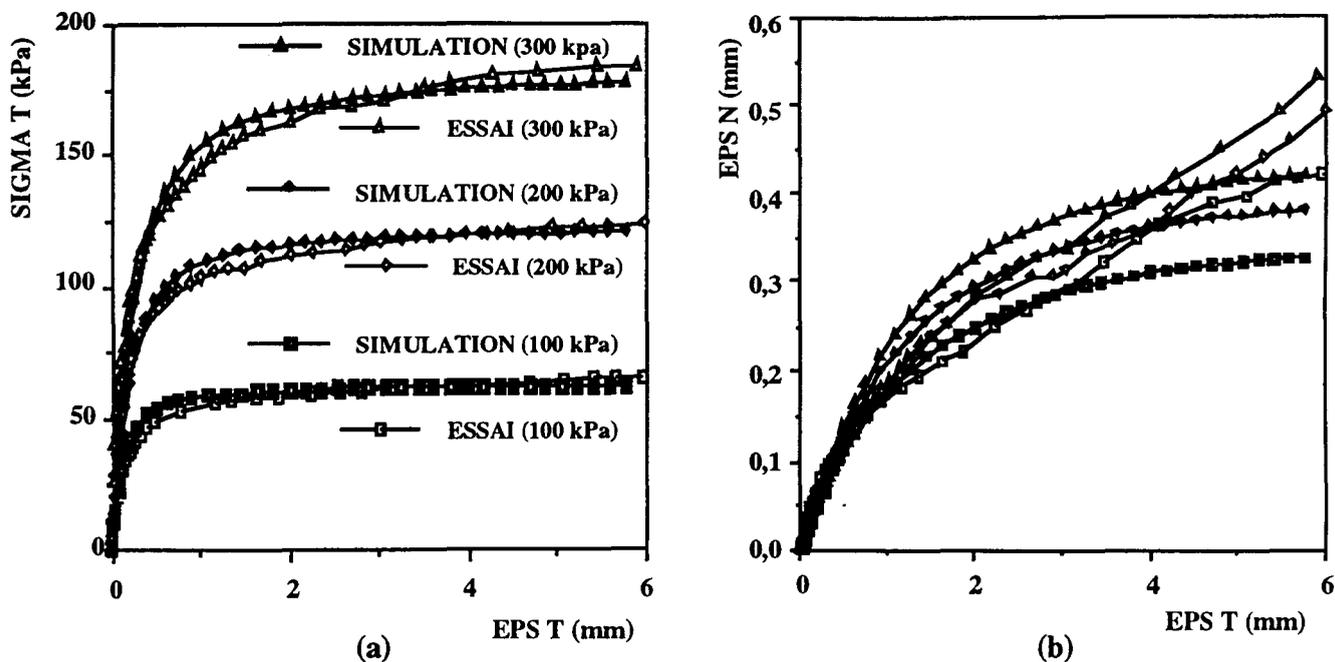


Figure : 4.23- Simulation des essais à contrainte normale constante

Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement
 b : Evolution du déplacement normal

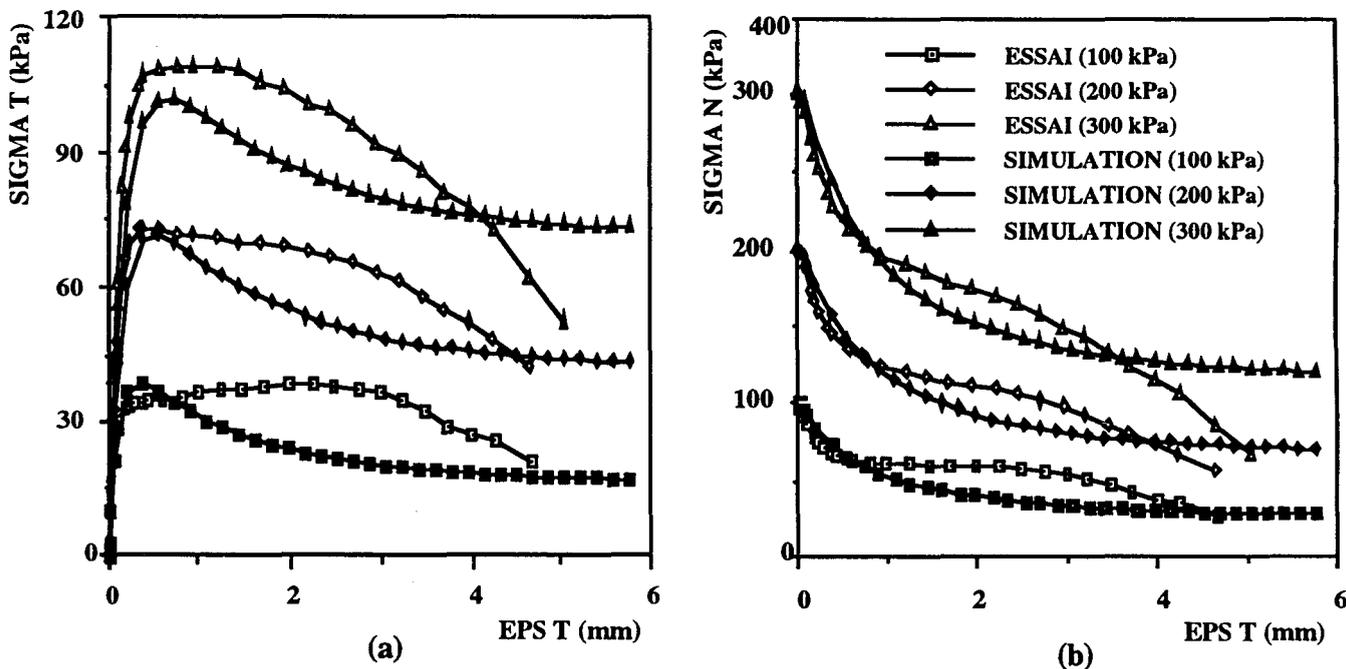


Figure : 4.24- Simulation des essais à déplacement normal bloqué

Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement
 b : Evolution de la contrainte normale

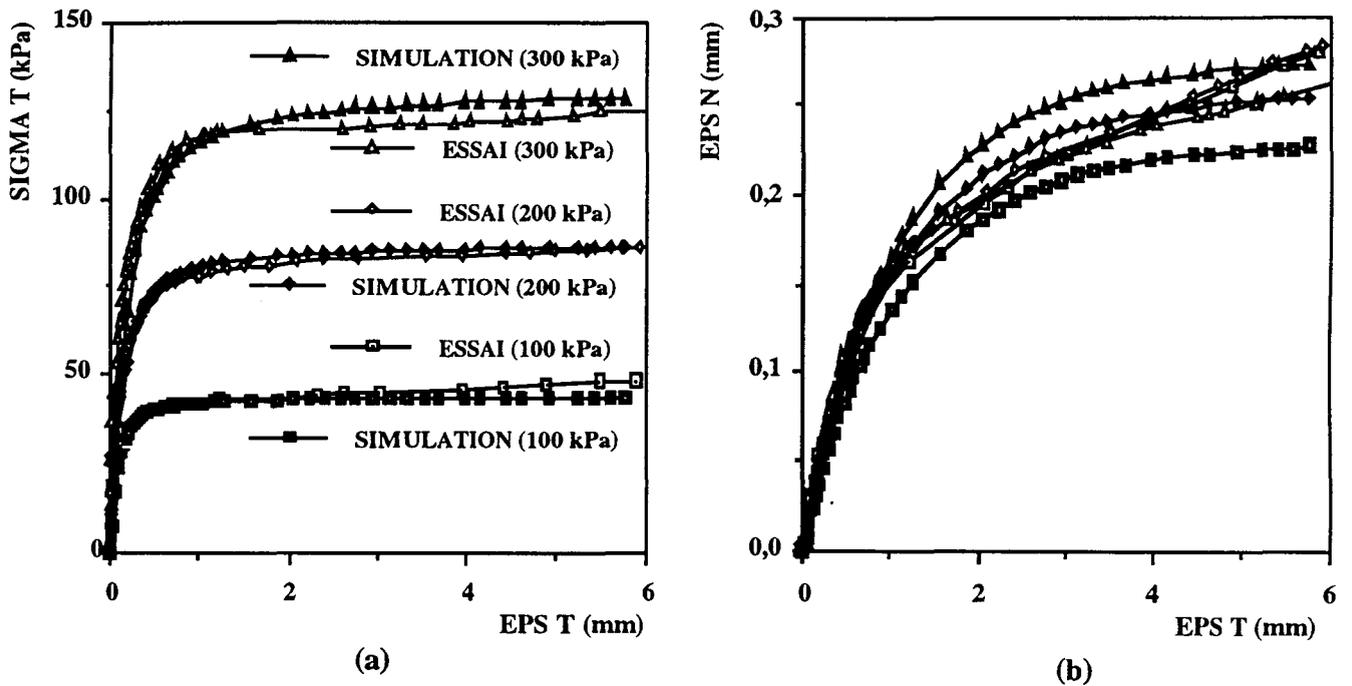


Figure : 4.25- Simulation des essais à contrainte normale constante

Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

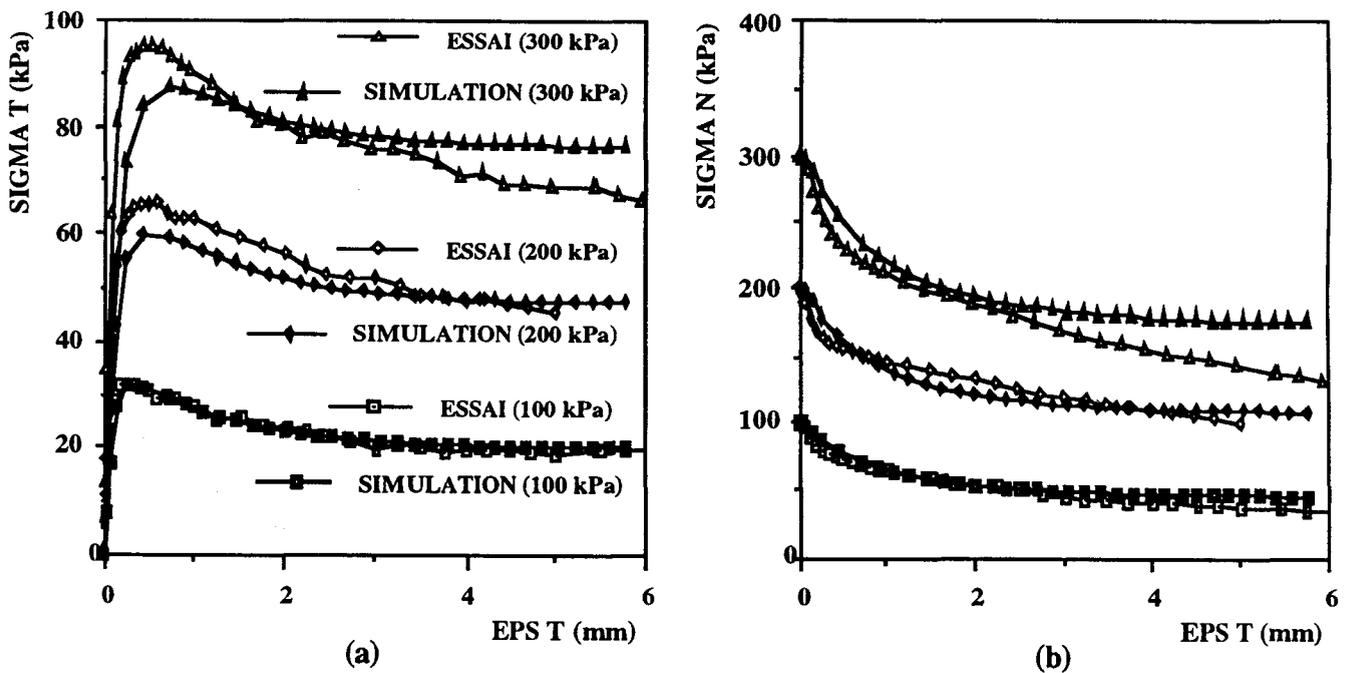


Figure : 4.26- Simulation des essais à déplacement normal bloqué

Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution de la contrainte normale

4.2. CHARGEMENT CYCLIQUE

4.2.1. Introduction

La modélisation du comportement cyclique de l'interface sols-structures se heurte au manque des données expérimentales nécessaires au développement et à la validation des modèles de comportement. Ainsi, les modèles proposés (Desai et al, 1985 ; Aubry et Modaressi, 1989; Shahrour et Bencheikh, 1992) ont été vérifiés soit sur le plan théorique soit sur des essais cycliques à contrainte normale constante, mais ne comportant pas de mesure du déplacement normal (Desai et al, 1985).

A partir des essais réalisés au cours de ce travail, nous avons effectué une validation de la version cyclique du modèle Modjoin (Shahrour et Bencheikh, 1992). Ces tests ont révélé des imperfections du modèle quant à la prédiction de l'évolution du déplacement normal et à la possibilité de contrôler l'érouissage induit par le chargement cyclique (Figures 4.27a à 4.28b). Ceci nous a conduit à reprendre l'écriture de ce modèle. Nous allons, ci-après, présenter la formulation du nouveau modèle et son utilisation sur les essais cycliques.

4.2.2. Formulation du modèle

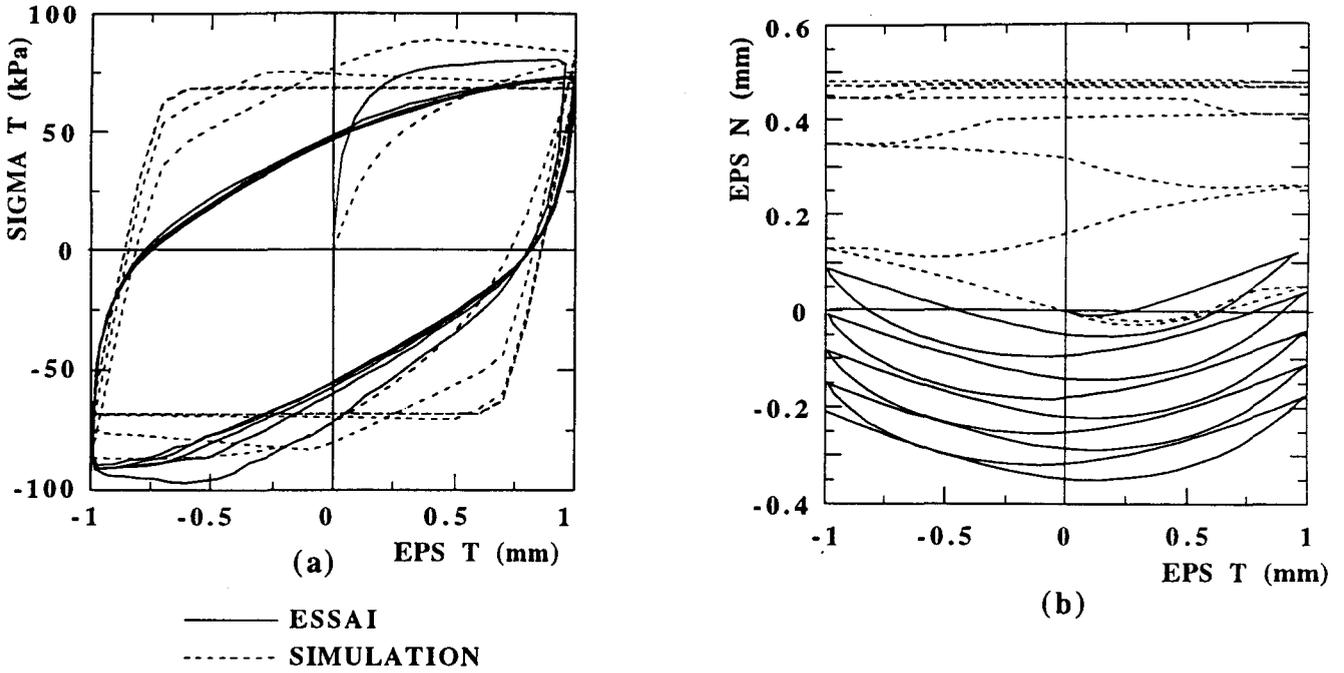
La nouvelle version du modèle est basée sur la théorie de la plasticité à érouissage cinématique associée à la technique de Bounding surface (Dafalias et al, 1976; Mroz et al, 1976; Mroz et al, 1979; Dafalias et al, 1982). Nous allons, ci-après, décrire la formulation de ce modèle.

4.2.2.1. *Partie élastique*

Pour des raisons de simplicité, la partie élastique est supposée linéaire. Elle comporte uniquement deux paramètres à savoir K et G .

4.2.2.2. *Surface de charge*

D'après les observations expérimentales, on note qu'à chaque inversion du chargement, l'interface a un comportement élastique et linéaire dans un petit domaine, ensuite son comportement devient non linéaire et irréversible. Pour décrire ce phénomène, on suppose l'existence d'une surface de charge à érouissage cinématique (Figure 4.29). Celle-ci est définie par rapport à un axe de référence dont la position est liée à l'histoire de chargement. On suppose également l'existence, dans le plan de contrainte, d'une surface limite (bounding surface) qui délimite les états de contraintes pouvant être atteints par l'interface. La surface limite est supposée de type Mohr-Coulomb. Son expression pour le sable est donnée par :



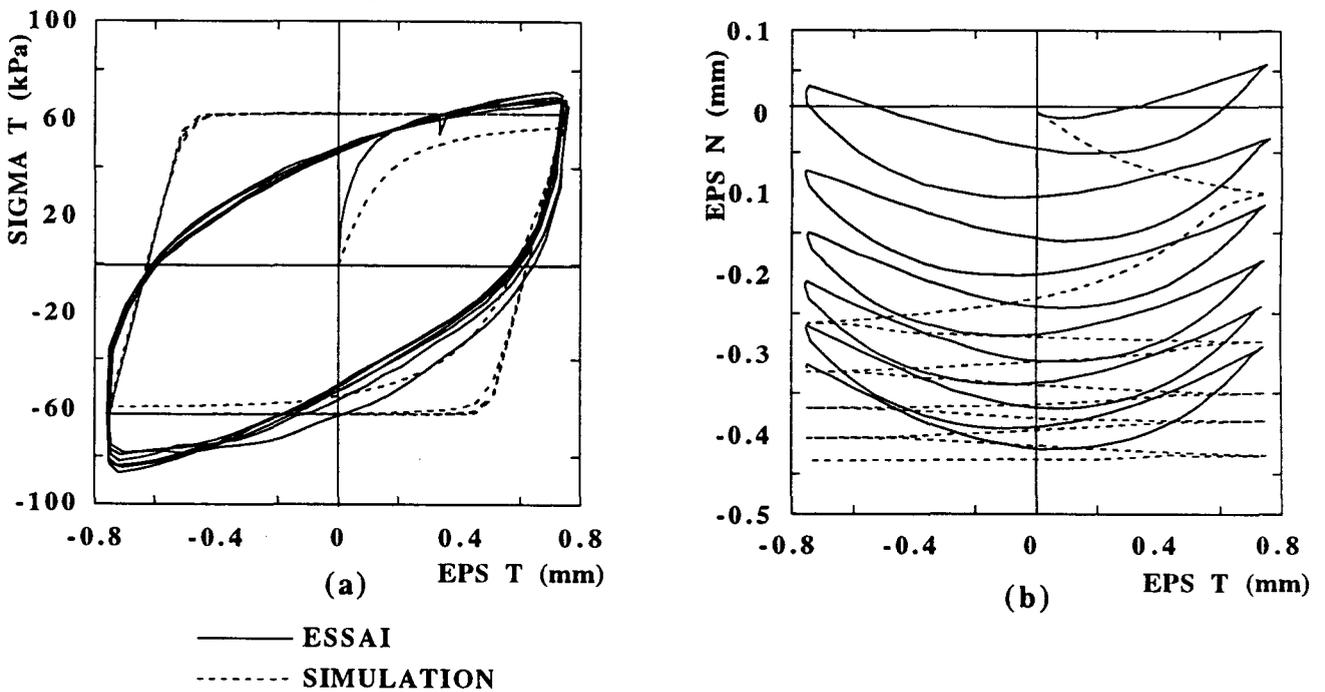
(Version non modifiée)

Figure : 4.27- Simulation des essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable d'Hostun dense ($D_r = 90\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal



(Version non modifiée)

Figure : 4.28- Simulation des essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, $-0,75\text{mm} \leq \gamma \leq +0,75\text{mm}$

Sable d'Hostun lâche ($D_r = 15\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal

$$f_l = |\tau| + \sigma_n R_{\max}$$

R_{\max} représente l'angle d'ouverture de cette surface. Elle s'exprime en fonction de l'angle de frottement et de l'histoire de chargement :

$$R_{\max} = \operatorname{tg} \phi + DR (1 - e^{-ADR \gamma^P})$$

avec :

$$\gamma^P = \int |d\varepsilon_t^P|$$

ϕ désigne l'angle de frottement au premier cycle, γ^P représente le déplacement tangentiel relatif plastique cumulé depuis le début du chargement, DR et ADR sont deux paramètres qui permettent de contrôler l'évolution de la surface limite au cours du chargement. Le paramètre DR peut être déterminé directement à partir du rapport des cisaillements au premier cycle et au cycle stabilisé. Le paramètre ADR est déterminé par calage.

En ce qui concerne la surface de charge cinématique, on suppose qu'elle est définie, par rapport à son axe, par un critère de type Mohr-Coulomb. L'expression retenue pour la fonction de charge est de la forme :

$$f_c = |\tau - \sigma_n R_c n_c| + \sigma_n R_0$$

R_0 désigne l'ouverture de la surface de charge. Par souci de simplicité, ce paramètre est supposé constant.

R_c désigne la fonction d'écrouissage cyclique qui est liée à l'histoire de chargement. Son évolution est régie par la relation :

$$dR_c = \lambda H_c$$

λ est le multiplicateur de plasticité.

La fonction H_c contrôle la vitesse d'écrouissage cyclique. Elle est supposée dépendre de l'angle compris entre l'axe de la surface de charge cinématique et la branche visée de la surface limite (Figure 4.29).

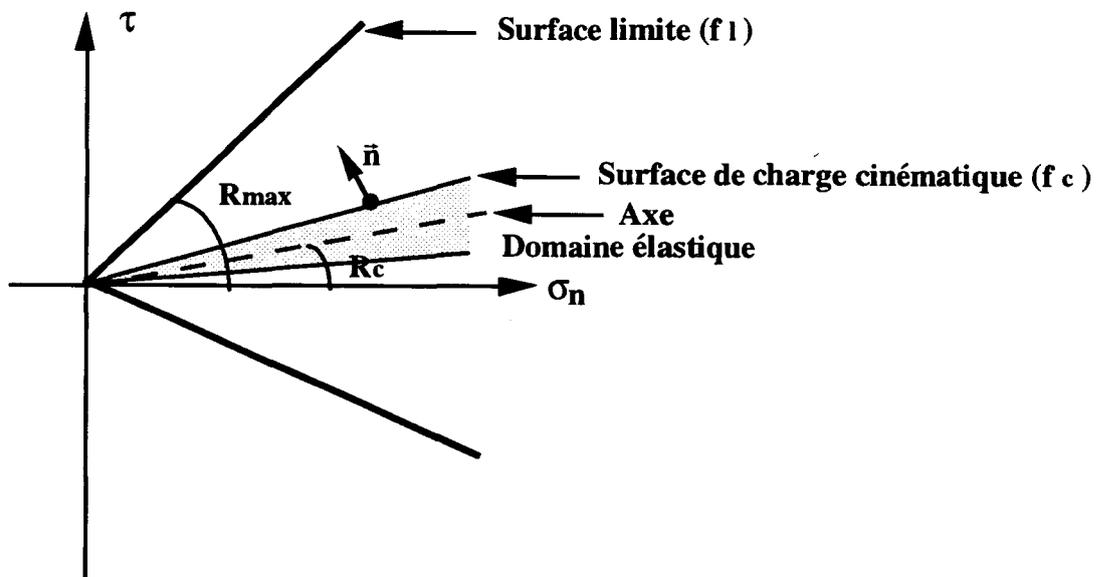


Figure : 4.29- Illustration du principe de la surface de charge cinématique

$$H_c = \gamma_c |R_{\max} * n_c - R_c|^{\beta_c}$$

γ_c et β_c sont deux paramètres du modèle qui permettent de contrôler l'évolution de l'écroissage cinématique.

Les figures 4.30a à 4.31b illustrent l'influence d'une variation de ces paramètres sur la forme des cycles. On constate que le paramètre γ_c affecte l'évolution de l'écroissage cyclique dès le début de l'inversion, alors que l'influence du paramètre β_c ne se manifeste qu'à un niveau de chargement plus élevé après chaque inversion.

Pour la détermination de ces paramètres, il est nécessaire de disposer d'un essai cyclique. Avec une valeur de β_c égale à l'unité, on cherche par calage une valeur du paramètre γ_c . Après la détermination de ce paramètre, on améliore par calage le paramètre β_c .

4.2.2.3. Règle d'écoulement

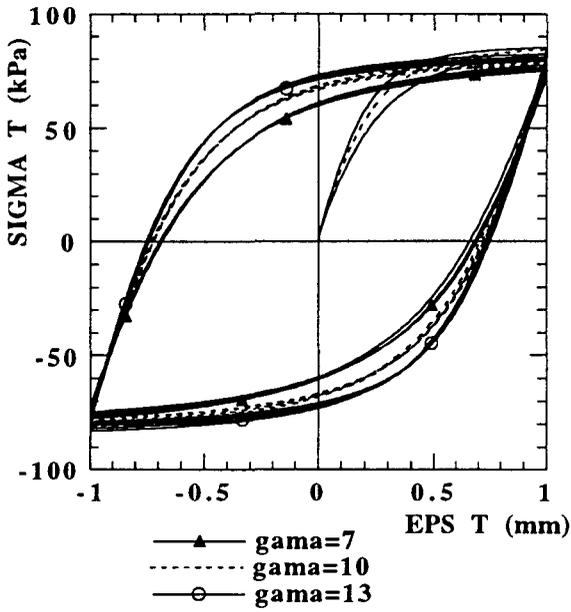
Les essais cycliques présentés au troisième chapitre montrent qu'à chaque inversion, le comportement de l'interface est contractant, puis qu'il devient dilatant. Afin de décrire ce phénomène, on exprime le gradient du potentiel sous la forme :

$$\text{Grad}(g) = \left| \frac{(\text{tg } \psi_c - \frac{\tau}{\sigma_n}) e^{-a_c \gamma_c^p}}{\frac{\tau}{\bar{\tau}}} \right|$$

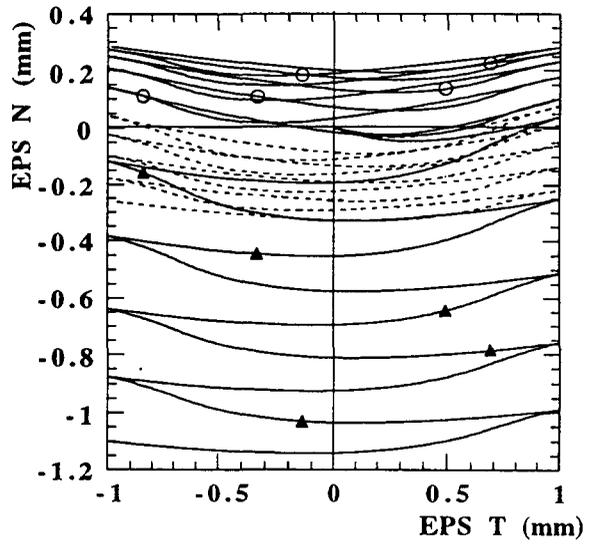
Dans le cas où l'incrément de contrainte est orienté à l'intérieur du potentiel de plasticité ($\frac{\partial g}{\partial \sigma} d\sigma < 0$), le calcul du gradient est effectué dans un repère lié à l'axe de la surface de charge :

$$\text{Grad}(g) = \left| \frac{(\text{tg } \psi_c - \frac{\tau - \sigma_n R_c}{\sigma_n}) e^{-a_c \gamma_c^p}}{\frac{\tau}{\bar{\tau}}} \right|$$

Dans ces expressions γ_c^p désigne le déplacement relatif tangentiel plastique cumulé depuis la dernière inversion.



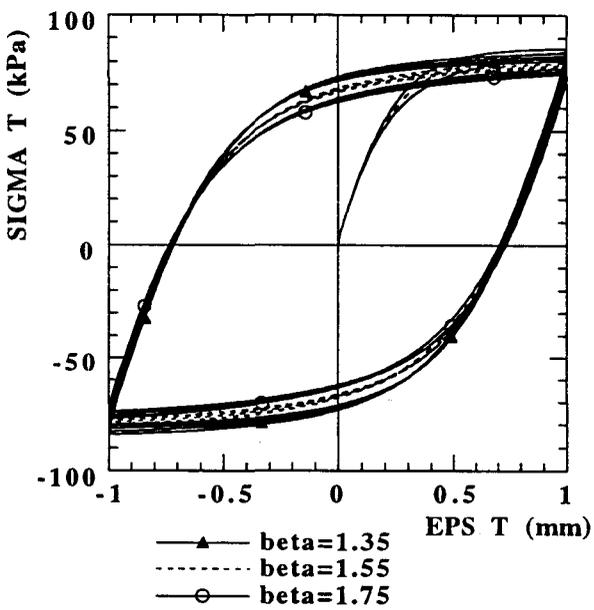
(a)



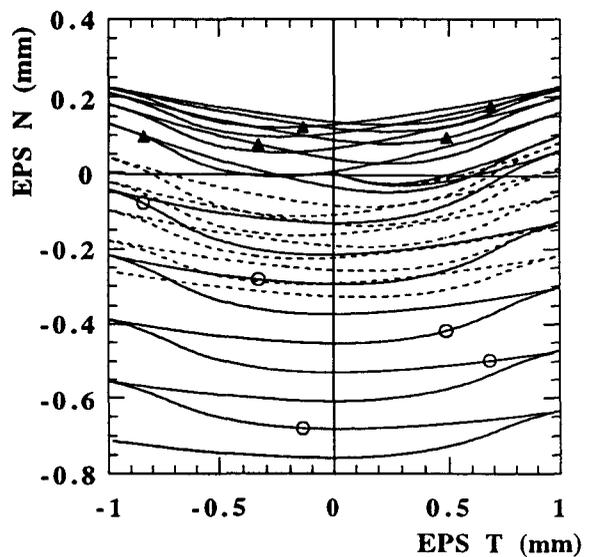
(b)

Figure : 4.30- Effet du paramètre γ_c

a et b : Chemin à contrainte normale constante



(a)



(b)

Figure : 4.31- Effet du paramètre β_c

a et b : Chemin à contrainte normale constante

Ψ_c et a_c sont deux paramètres du modèle. Le premier est déterminé au changement de phase (passage du domaine contractant au domaine dilatant) lors des cycles de chargement. Le second est un paramètre de calage qui assure la stabilisation du déplacement normal au haut niveau du déplacement relatif tangentiel.

4.2.3. Simulation des essais cycliques

Les paramètres du modèle ont été déterminés à partir des essais cycliques réalisés à contrainte normale constante, pour les différentes densités et rugosités. Le tableau 4.2 récapitule les valeurs des paramètres trouvées. Nous allons, ci-après, décrire la reproduction des essais de calage et la vérification du modèle sur les essais à déplacement normal bloqué.

4.2.3.1. Surface rugueuse

Sable dense

Les figures 4.32a et 4.32b illustrent la simulation d'un essai cyclique réalisé à contrainte normale constante qui a servi à l'identification des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit correctement l'évolution de la contrainte de cisaillement. Il reproduit bien le module initial et l'évolution de l'écroûissage cyclique. On note également que le modèle reproduit bien l'évolution du déplacement normal, en particulier la contractance à chaque inversion, le changement de phase et la valeur du déplacement cumulé.

Les figures 4.33a et 4.33b illustrent les résultats de vérification du modèle sur un essai cyclique réalisé à déplacement normal bloqué. On constate que le modèle reproduit qualitativement l'évolution de la contrainte normale : diminution à chaque inversion suivie par une augmentation. En fin de chargement, le modèle reproduit bien la nette diminution de la contrainte normale sur la diminution de la contrainte de cisaillement mobilisée.

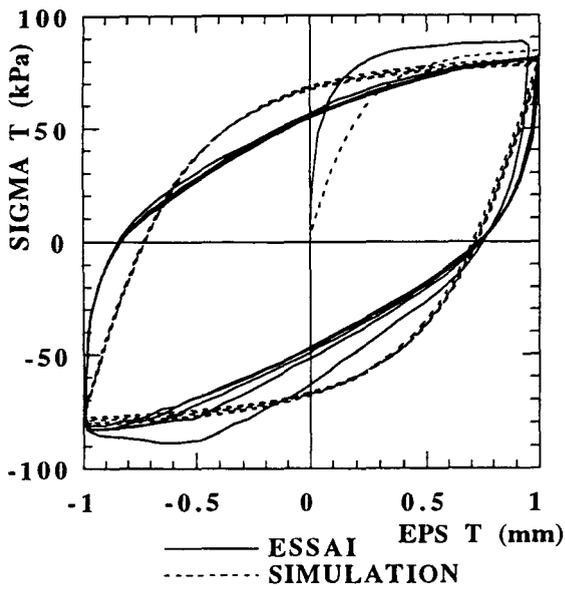
Sable lâche

Les figures 4.34a et 4.34b illustrent 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. En ce qui concerne le déplacement normal, on note que le modèle reproduit bien son évolution au cours du chargement.

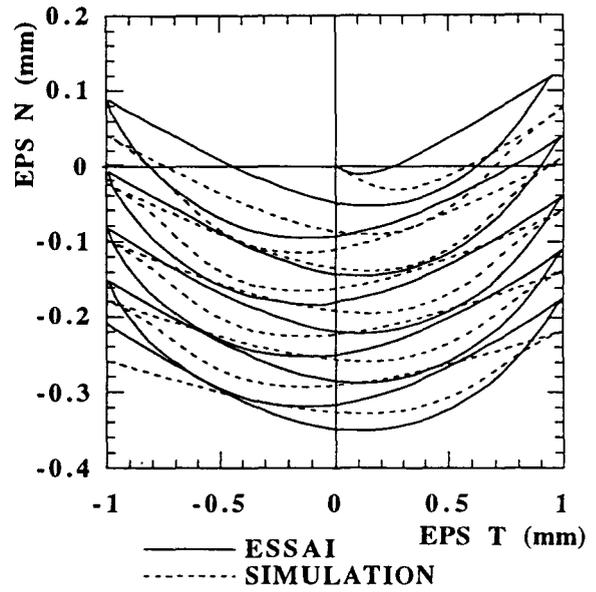
Le modèle a été testé sur un essai cyclique réalisé à déplacement normal bloqué. Les figures 4.35a et 4.35b illustrent les résultats obtenus. On note que le modèle reproduit bien l'évolution des contraintes normale et du cisaillement, en particulier leur diminution au cours des cycles successifs.

Paramètres	K	G	$\Phi(^{\circ})$	$\psi_c(^{\circ})$	a_c	γ_c	β_c	DR	ADR
Essais	(100kPa/mm)	(100kPa/mm)							
Lisse-lâche	5	4	24	23	0,05	6	0,7	-0,05	0,2
Rugueuse-lâche	5	4	32	30	0,01	7	1,1	0,1	0,1
Rugueuse-dense	8	5	41	32	0,03	10	1,55	-0,1	0,05

Tableau : 4.2 - Paramètres du modèle cyclique déterminés à partir des essais à $\sigma_n = \text{Cste}$



(a)



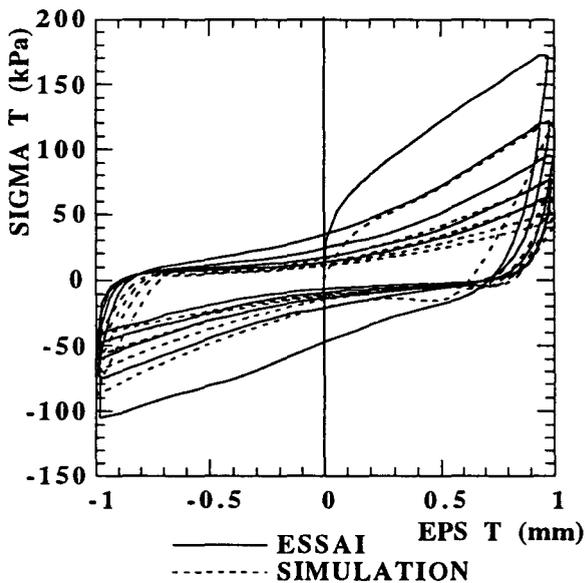
(b)

Figure : 4.32- Simulation des essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

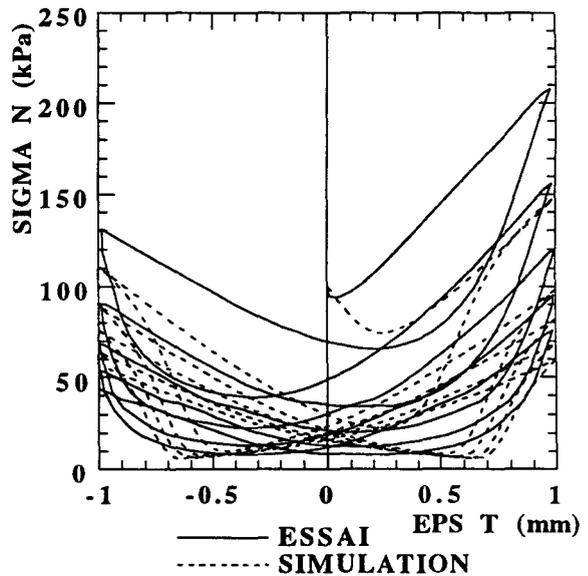
Sable d'Hostun dense ($D_r=90\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal



(a)



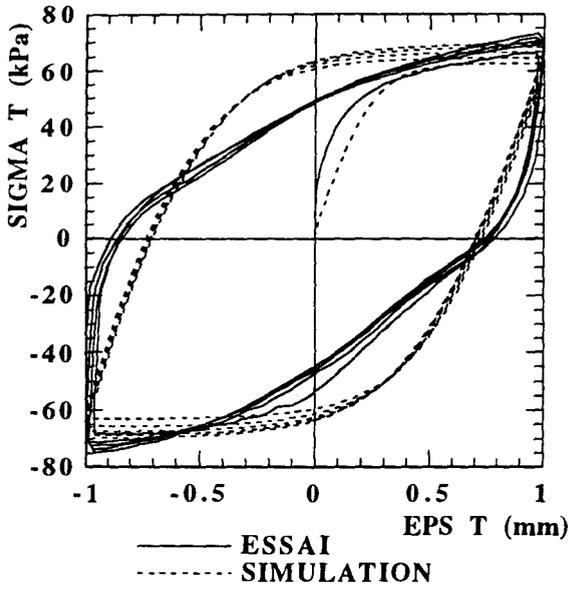
(b)

Figure : 4.33- Simulation des essais cycliques à $\epsilon_n=0$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

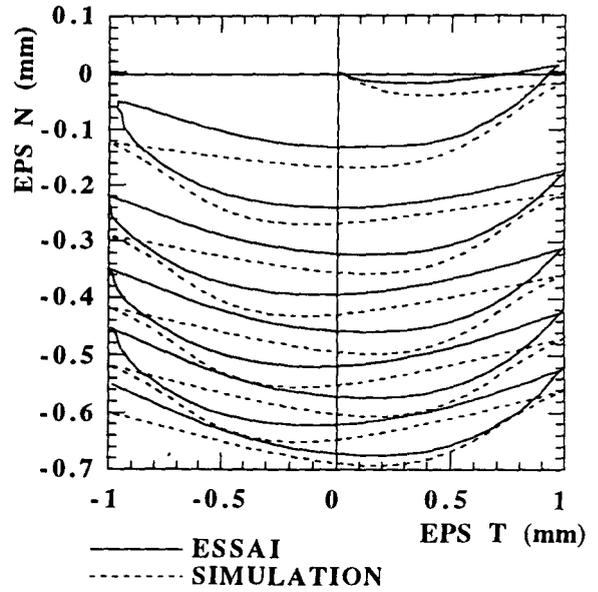
Sable d'Hostun dense ($D_r=90\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution de la contrainte normale



(a)



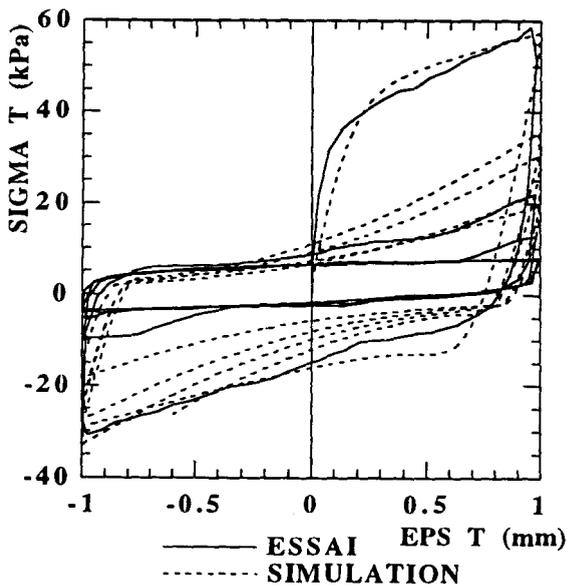
(b)

Figure : 4.34- Simulation des essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

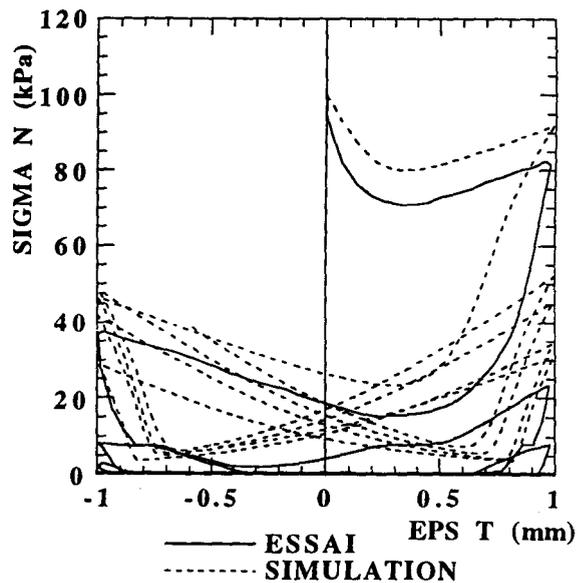
Sable d'Hostun lâche ($D_r=15\%$), surface rugueuse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal



(a)



(b)

Figure : 4.35- Simulation des essais cycliques à $\epsilon_n=0$, $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$

Sable d'Hostun lâche ($D_r=15\%$), surface rugueuse

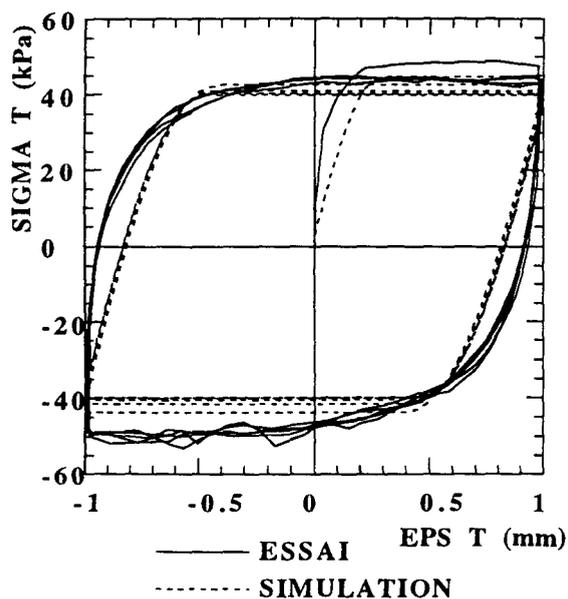
a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution de la contrainte normale

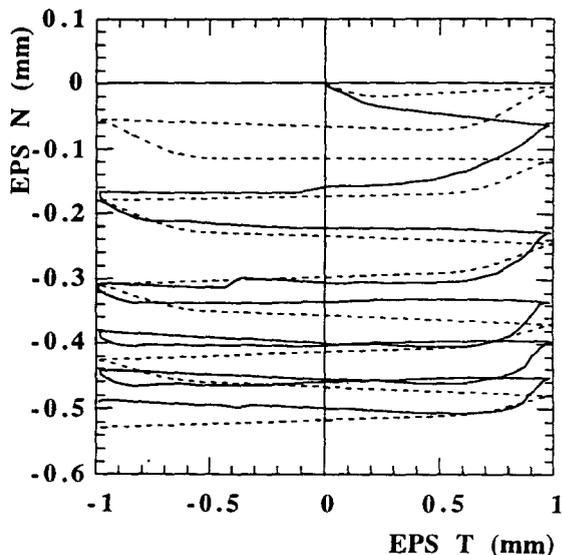
4.2.3.2. *Surface lisse*

Les figures 4.36a et 4.36b montrent les résultats de simulation d'un essai cyclique réalisé à contrainte normale constante qui a servi à la détermination des paramètres du modèle. On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement, mais il prédit moyennement l'évolution du déplacement normal.

Les figures 4.37a et 4.37b montrent les résultats de vérification de l'essai cyclique réalisé à déplacement normal bloqué. On constate que le modèle prédit qualitativement la diminution de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement induit par le chargement cyclique.



(a)



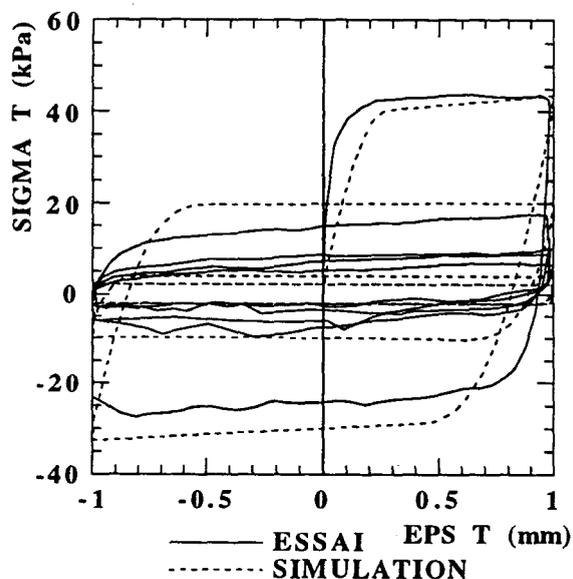
(b)

Figure : 4.36- Simulation des essais cycliques à $\sigma_n = \text{cste}$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

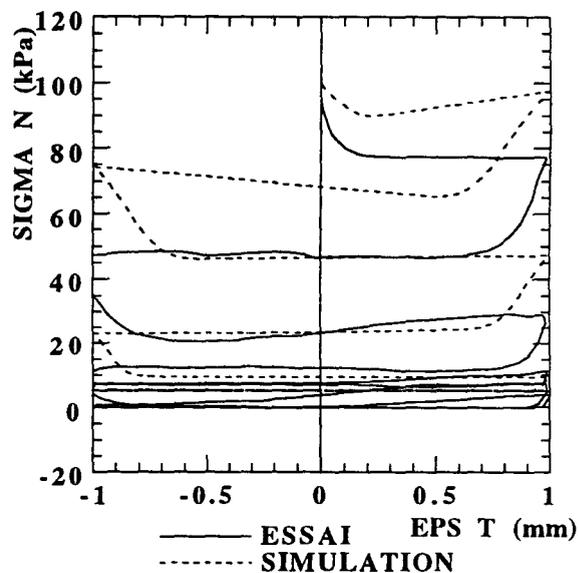
Sable d'Hostun lâche ($D_r=15\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution du déplacement normal



(a)



(b)

Figure : 4.37- Simulation des essais cycliques à $\epsilon_n=0$, $-1 \text{ mm} \leq \gamma \leq +1 \text{ mm}$

Sable d'Hostun lâche ($D_r=15\%$), surface lisse

a : Evolution de la contrainte de cisaillement

b : Evolution de la contrainte normale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé dans le but d'apporter une contribution à la modélisation du comportement de l'interface sols-structures qui conditionne d'une manière sensible le comportement de nombreux ouvrages de Génie Civil.

Dans un premier temps, des essais d'interface monotones ont été réalisés avec les sables d'Hostun et Quiou denses et lâches et des surfaces lisse et rugueuse. Ces essais ont servi à la validation de la version monotone d'un modèle développé dans notre laboratoire pour l'interface sols-structures (**Modjoin**).

Devant le manque d'essais cycliques d'interface, une partie importante de ce travail a été consacrée à l'étude expérimentale du comportement cyclique de l'interface. Des essais ont été réalisés pour analyser l'influence sur ce comportement des principaux paramètres, à savoir : la densité du sable, la rugosité de l'interface et le niveau et la forme des cycles du chargement. Ces essais ont montré que le chargement cyclique induit un écrouissage cyclique qui se traduit par un durcissement ou un radoucissement selon la densité du sable, la rugosité de l'interface et le niveau du chargement. Ils ont également mis en évidence que le comportement de l'interface est contractant à chaque inversion du sens du chargement et que le déplacement normal cumulé est contractant pour les surfaces lisse et rugueuse et les sables lâches et denses.

La validation de la première version cyclique du modèle **Modjoin**, sur les essais réalisés, a révélé de nombreuses imperfections, notamment une mauvaise description de l'écrouissage et de l'évolution du déplacement normal. Ceci nous a conduit à modifier cette version en introduisant un couplage de l'écrouissage cyclique avec la "Bounding surface". La validation de la nouvelle version du modèle a donné des résultats satisfaisants.

La nouvelle version cyclique du modèle va être intégrée dans un programme de calcul par éléments finis en vue de sa validation sur ouvrages instrumentés (pieux sous chargements cycliques) et ensuite son utilisation pour le calcul d'ouvrages sous chargements cycliques et sismiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIREY.D.W. & FAHEY.M.** (1991)- "Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia" - Jour. of Geotech. Eng. Vol. 41, No. 1, pp.101-121.
- AUBRY D., MODARESSI A. & MODARESSI H.** (1989)- "A constitutive model for cyclic behaviour of interfaces and its application in dynamic analysis" Euromech 248, Grenoble.
- BENCHEIKH B.** (1991)- "Interaction sols-structures: modélisation et résolution numérique"- Thèse de doctorat de l'U.S.T.L.
- BJERRUM L. & LAMBVA A.** (1966)- "Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay." Geotechnique, Vol. 16, No.1, pp. 1-20.
- BOULON M., DARVE F., DESRUES J. & FORAY P.** (1977) - "Soil-structure coupling. Non linear rheological relationships and Boundary conditions in soil mechanics" - Computers and Structures, Vol. 9, pp. 293-303.
- BOULON M., HOTEIT N. & MACHINA P.** (1988) - "A complete constitutive law for soil structure interfaces" - Num. Meth. in Geom. Balkema, Rotterdam.
- BOULON M.** (1991) - "Le comportement d'interface sols-structures : Aspects expérimentaux et numériques"- Rev. Franç. Géotech. No. 54. pp.27-37.
- BOULON M. & NOVA R.** (1990)- "Modelling of soil-structure interface behaviour- A comparison between elastoplastic and rate type model" Computer & Geotechnics, Vol. 9, pp. 21-46.
- BRUMUNDI W.F. & LEONARDS G.A.** (1973) - "Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials" - Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 1, No. 2, pp. 162-165.
- BUDHU M.** (1985) - "Lateral stresses observed in two simple shear apparatus" - Journ. of Geotech. Engin., Vol. 111, No. 6, pp. 698-711.
- DAFALIAS Y. F. & al** (1976) - "Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity". Jour. Appl. Mech., Vol. 43, pp.645-650.
- DAFALIAS Y. F. & al** (1982) - "The bounding surface plasticity model for isotropic cohesive soils and its application". Int. Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble, Ed by Gudehus F. & al. pp. 273-287.
- DESAI C.S.** (1981) - "Soil structure interaction and simulation problems" - Chapter 7, Finite elements in Geomechanics, pp. 209-250.
- DESAI C.S., DRUMM E.C. & ZAMAN M.M.** (1985) - "Cyclic testing and modelling of interfaces" - Jour. of Geotech. Eng., Vol. 111, No. 6, pp. 793-815.
- DESAI C.S., ZAMAN M.M., LIGHTNER J.G. & SIRIWARDANE H.J.** (1984) - "Thin-Layer element for interface and joints" - Int. Jour. for Num. and Anal. Meth. in Geom., Vol. 8, pp. 19-43.
- GARNICA P.** (1993) - "Simulation numérique du comportement des groupes de pieux par la méthode des équations intégrales aux frontières, Nouvelle thèse, U. J. F. G.
- GHABOUSSI J., WILSON E.L. & ISENBERG J.** (1973) - "Finite element for rock joints and interfaces" - Jour. of the soil Mech. and Found. Division, Vol. 99, No. SM10.

- GOLIGHTLY C.R. & HYDE A.F.L.** (1988)-" Some fundamental properties of carbonate sands"- Eng. for Calcareous Sediments- Vol. No.1, pp. 69-78.
- GOODMAN R.E. ;TAYLOR R.L. & BREKKE T.L.** (1968) - "A model for the mechanics of jointed rock" - Journ. of the soil Mech. and Found. Division, Vol. 94, No. SM3, pp. 637-659.
- GOODMAN R.E. & DUBOIS J.** (1972) - "Duplication of dilatancy in analysis of jointed rocks". Journ. of the soil Mech. and Found. Division, Vol. 98, No. SM4.
- GOODMAN R.E. & St JOHN C.** (1977) - "Finite element analysis for discontinuous rocks" - Numerical Methods in Geotechnical Engineering.
- HOTEIT N.** (1990) - "Contribution à l'étude du comportement d'interface sable- inclusion et application au frottement apparent"- Thèse de doctorat. à l'I. N. P. G.
- ISHIHARA K.** (1972) - "Liquefaction saturated sand in triaxial torsion shear test" - Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 19-39.
- JEWELL R.A. & WROTH C.P.** (1987) - "Direct shear tests on reinforced sand" - Géotechnique 37, No. 1, pp. 53-68.
- 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.
- KJELLMAN W.** (1951)- "Testing the shear strength of clay in Sweden." Geotechnique Vol. 2, No. 3, pp. 225-232.
- LADE P.V.** (1975) - "Torsion shear tests on cohesionless soil" - 5 th Panam Conference. Buenos Aires, Argentine, Vol. 1.
- LUONG MINH PHONG** (1979) -"Phénomènes cycliques dans les sols pulvrulents"- Revue française de Gotechnique numéro 10.
- MEIMON Y.; THOMAS P.A.; NAUDIN J.C. & PEROL C.** (1981) - "Calculation of the soil structure contact of Jack up foundations" - Inter. Conf. on Num. Meth. for coupled Problems, Swansea, pp. 643-654.
- MOHKAM M.** (1983) - "Contribution à l'étude expérimentale et théorique du comportement des sables sous des chargements cycliques" - Thèse D. I. à l'U. S. M. I. N. P. G.
- MOUTRAJI J.** (1992) - "Etude expérimentale et numérique du cisaillement direct silt-structure. Application à l'amélioration du frottement latéral dans les sols fins". Thèse de doctorat à l'U. J. P. G.
- MROZ Z. & al** (1976) - "A non-linear hardening model and its application to cyclic loading". Acta. Mech., Vol. 25, pp. 51-61.
- MROZ Z. & al** (1979) - "Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elastoplastic deformation of soils". Géotechnique, Vol. 31, pp. 293-302.
- OTTOSEN N. S. & OLSSON K. G.** (1988) - "Hardening/softening plastic analysis of adhesive joint". - Journal of Engineering Mechanics, Vol. 114, No. 1.
- PANDE G. N. & SHARMA K. G.** (1978) - "On joint / interface elements and associated problems of numerical III-conditioning" - Short communications, Int. Jour. of Num. Meth. in Geom., Vol. 3, pp. 293-299.

- PLYTAS. C.** (1985) - "Contribution à l'étude expérimentale et numérique des interfaces sols granulaires-structures- Application à la prévision du frottement latéral des pieux". Thèse D.I. Université de Grenoble, I.M.G.
- POTYONDY J.G.** (1961) - "Skin friction between various soils and construction materials" - *Geotechnique*, 24, No. 4, pp. 339-353.
- REZAIÉ F.** (1991)- " Etude de l'interface a l'aide d'une boîte de cisaillement " - Mémoire de D.E.A , Université des Sciences et Techniques de Lille.
- ROSCOE K. H.** (1953)- "An apparatus for the application of simple shear to soil samples." *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mecha. Found. Eng. Vol. 1*, pp. 186-191.
- ROUAINIA M. ; BOULON M. & GARNICA P.** (1992) - "Model and validation of non-linear soil-structure interface behaviour, for pile problem, Fourth Int. Cof. on of Num. Meth. in Gaom., Swansea U. K.
- SAADA A. S. & TOWNSEND F. C.** (1981)- "State of the art: Laboratory strength testing of soils. Lab. shear strength of soils. ASTM Special Technical publication 740. ASTM, Philadelphia, pp. 7-77.
- SHAHROUR I. & BENCHEIKH B.** (1992)- "Analysis of the soil-structure interaction under montonic and cyclic loadings"- First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Bruxelles, Edition Ch Hirsch, O.C. Zienkiewicz and E. Onate, pp. 269-275.
- SHAHROUR I ; BENCHEIKH B & REZAIÉ F.** (1992)- " Etude du comportement cyclique de l'interface sols-structures " - Rapport scientifique du Greco-Géomatériaux, pp. 243-248.
- SHAHROUR I. & REZAIÉ F.** (1993)- " Etude en laboratoire du comportement d'interface sous chargements monotone et cyclique " - Sixième Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols appliquée, pp. 400-408.
- WERNICK** (1979)- "A true direct shear apparatus" to mesure soil parameters of shear bands". *Design Param. in Geotech. Eng. BGS. Vol. 2*, pp. 175-182.
- YOSHIMI Y. & KISHIDA T.** (1981) - "A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces" - *Geotechnical testing Journal, GT JODJ*, Vol. 4, No. 4, pp. 145-152.
- YOUD L. & BUDHU M** (1985) - "Non uniformities imposed by simple shear apparatus". *Can. Geotech. Jour.* 20, pp. 125-137.
- ZAMAN M.** (1984) - "Models for slidding and separation at interface under static and cyclic loading" - *Proceedings, Inter. Conf. of Const. laws for Engin. Mat., Tucson, Ariz.,* pp. 383-390.
- ZAMAN M.M.; DESAI C.S. & DRUMM E.C.** (1984) - "Interface model for dynamic soil-structure interaction" - *Jour. of Geotech. Engin., Vol. 110, No. 9.*
- ZIENKIEWICZ O.C.** (1971) - "The finite element method in engineering science" - Mc Graw-Hill, London.

